



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

DYNAMICKÝ MODEL LI-ION ČLÁNKU

DYNAMIC LI-ION BATTERY MODEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Vojtěch Loucký

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Toman

BRNO 2019

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Vojtěch Loucký

ID: 195382

Ročník: 3

Akademický rok: 2018/19

NÁZEV TÉMATU:

Dynamický model Li-ion článku

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte rešeršní studii matematických modelů Li-ion článků.
2. V programu Matlab-Simulink vytvořte dynamický matematický model Li-ion článku.
3. Výsledky simulací porovnejte s měřením na reálném článku a zhodnoťte funkčnost modelu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] P. Vorel, M. Patočka: Průmyslová elektronika. VUT v Brně, 2007.
- [2] M. Patočka: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice. VUTIUM, 2011.
- [3] A. Rahmoun, H. Biechl: Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. Przegląd Elektrotechniczny, 2012.

Termín zadání: 4.2.2019

Termín odevzdání: 22.5.2019

Vedoucí práce: Ing. Marek Toman

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá srovnáním a následným vytvářením dynamického modelu Li-Ion baterie v programu MATLAB. Jsou zde porovnány různé matematické modely z pohledu jejich nedostatků. Je zde podrobně popsán model Vylepšeného Theveninova modelu, který je následně vytvořen v simulačním prostředí Simulink programu MATLAB a jsou na něm provedeny simulace pro různé vybíjecí a nabíjecí proudy. Tento model je následně upraven na parametry, které byly získány ze zpracování naměřených dat na reálném článku. Výsledné průběhy jsou srovnány s modelem a je zhodnocena jeho funkčnost.

Klíčová slova

MATLAB, Li-Ion, Simulink, Baterie, Simulace, Model

Abstract

The main aim of this work is to compare mathematical models of Li-Ion batteries and for the chosen mathematical model create dynamic model in MATLAB. Different mathematical models are compared based on their weakness. There is detailed description of Improved Thevenin model, which is then created in Simulink and is tested for various discharging currents. This model is adjusted to work with parameters obtained from measuring data on real Li-ion cell and the results from simulations are compared with results from real measurements.

Keywords

MATLAB, Li-Ion, Simulink, Battery, Simulation, Model

Bibliografická citace:

LOUCKÝ, Vojtěch. *Dynamický model Li-ion článku*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117571>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Ing. Marek Toman.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Dynamický model Li-Ion článku jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Marka Tomana a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Marku Tomanovi, za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne:

.....

podpis autora

Obsah

1	Úvod.....	11
2	Li-Ion články	12
2.1	Historie	12
2.2	Princip funkce	12
2.3	Výhody a nevýhody Li-Ion článků	14
3	Matematické modely Li-Ion článků	16
3.1	IR model.....	16
3.2	Impedanční model.....	17
3.3	Theveninův model.....	17
3.4	PNGV model.....	18
3.5	Vylepšený Theveninův model.....	20
3.6	Upravený Theveninův model s dvěma paralelními větvemi.....	21
3.7	Vybrané matematické modely pro tvorbu v Simulink	24
4	Identifikace parametrů	28
4.1	Měření na Li-Ion článku.....	28
4.2	Zpracování naměřených dat	30
5	Matematický model v programu Matlab.....	39
5.1	Vytvoření modelu.....	39
5.2	Vytvoření modelu dle naměřených průběhů	42
5.2.1	PI regulátor	42
5.2.2	Vybíjecí část	44
5.2.3	Nabíjecí část.....	45
5.2.4	Vytvoření prvního typu realizovaného modelu – jednodušší model	46
5.2.5	Výpočet chyby	47
6	Srovnání měřených dat s výsledky simulace	48
6.1	Pulsní vybíjení.....	48
6.2	Pulsní nabíjení.....	51
	Závěr	54

Seznam obrázků

Obr. 1: Princip funkce Li-Ion článku [4]	13
Obr. 2: Procentuální samovybití u různých typů baterií [5]	14
Obr. 3: Schéma ekvivalentního modelu IR [7]	16
Obr. 4: Schéma ekvivalentního impedančního modelu	17
Obr. 5: Schéma Theveninova modelu [7]	18
Obr. 6: Schéma obvodu PNGV modelu [10]	19
Obr. 7: Schéma obvodu Vylepšeného PNGV modelu	20
Obr. 8: Schéma obvodu Vylepšeného Theveninova modelu [11]	21
Obr. 9: Schéma Upraveného Theveninova modelu	22
Obr. 10: Teplotně závislá napěťová korekce [15]	24
Obr. 11: Schéma obvodu Vylepšeného Theveninova modelu [11]	25
Obr. 12: Odezva na skok na vybíjecím proudu [9]	26
Obr. 13: Řídicí jednotka NI-cRIO-9082 s kartami snímající teplotu, napětí a proud	28
Obr. 14: Měřicí soustava	29
Obr. 15: Nahrání do struktury MATLAB	30
Obr. 16: Průběh nabíjení a vybíjení baterie pro určení vnitřních parametrů [16]	30
Obr. 17: Průběh napětí při pulsním vybíjení Li-ion článku	31
Obr. 18: Výpočet parametrů	32
Obr. 19: Určené parametry R_0 , R_{pk} , C_{pk} pro dvě paralelní větve	36
Obr. 20: Určené parametry R_{pd} , C_{pd} , U_{oc} pro dvě paralelní větve	36
Obr. 21: Určené parametry R_0 , U_{oc} pro jednu paralelní větev	37
Obr. 22: Určené parametry R_p , C_p pro jednu paralelní větev	38
Obr. 23: Blokové schéma výpočtu SOC	40
Obr. 24: Blokové schéma výpočtu parametrů obvodu a aplikace 2. Kirchhoffova zákona	41
Obr. 25: Výpočet ve skriptu pro 1-D Lookup table	41
Obr. 26: Obecná vybíjecí charakteristika Li-ion článku	42
Obr. 27: PI regulátor	44
Obr. 28: Subsystem výpočtu odporu	45

Obr. 29: Bezpečnostní obvod.....	45
Obr. 30: Schéma zjednodušeného modelu.....	46
Obr. 31: Výpočet relativní chyby měření	47
Obr. 32: Srovnání měření se simulací pro pulsní vybíjení pro jednodušší model	48
Obr. 33: Detail srovnání pulsního vybíjení pro jednodušší model	49
Obr. 34: Srovnání měření se simulací pro pulsní vybíjení pro složitější model	49
Obr. 35: Detail srovnání pulsního vybíjení pro složitější model	50
Obr. 36: Srovnání měření se simulací pro pulsní nabíjení jednoduššího modelu.....	51
Obr. 37: Detail srovnání pulsního nabíjení pro jednodušší model	52
Obr. 38: Srovnání měření se simulací pro pulsní nabíjení složitějšího modelu.....	52
Obr. 39: Detail srovnání pulsního nabíjení pro složitější model	53

Seznam tabulek

Tabulka 1: Koeficienty pro výpočet korekčního členu a R_c pro různé teploty [14]. 23

1 ÚVOD

Baterie jsou zařízení, které nás obklopují a bez nichž si náš život už ani nedovedeme představit. Díky technologickému pokroku jejich důležitost stále roste a rostou také nároky na jejich kvalitu. Se zvyšující se kvalitou a vývojem modernějších typů baterií se zvyšují také nároky na jejich testování. Jelikož testování hotových baterií by bylo finančně nákladné, je proto nutné toto testování provádět v určitém simulačním prostředí. Takovéto prostředí obsahuje například program Matlab, jehož část Simulink, společně se samotným programem Matlab, byla využita pro tvorbu mé bakalářské práce.

Cílem této práce je výběr a následná realizace dynamického modelu lithium-iontového článku v simulačním prostředí Simulink programu Matlab, zpracování dat naměřených na reálném lithium – iontovém článku a následné srovnání výsledků simulací s výsledky naměřenými na článku a zhodnocení celkové funkčnosti modelu.

V úvodu této bakalářské práce jsou stručně představeny samotné Li-Ion články. Bude zde přiblížena jejich historie, princip fungování a také výhody a nevýhody. V další části této bakalářské práce budou následně analyzovány a porovnávány různé matematické modely a srovnávány jejich případné výhody a nedostatky. Následně bude krátce představen samotný program Matlab a jeho simulační prostředí Simulink, který bude použit pro simulaci dynamického modelu. V navazující části bude vybrán konkrétní matematický model a bude provedeno určení parametrů simulované baterie pro různé stavy nabití a bude realizován samotný dynamický model v Simulinku.

Další část této práce bude zaměřena na práci s naměřenými daty a následné určení parametrů neznámé lithium – iontové baterie. Tato zpracovaná data budou následně srovnána s výstupem modelu v prostředí Simulink. Testovaný model bude upraven na vnitřní parametry baterie a bude díky tomu reprezentovat testovací baterii. Závěr této části bude zaměřen na porovnání výsledných průběhů s reálnými průběhy, celkovou funkčností a reálností modelu, přičemž budou zhodnoceny výhody a nevýhody vytvořeného modelu a budou navrženy možnosti dalších modifikací pro případné zlepšení přesnosti výsledných simulací.

Výsledkem této bakalářské práce tedy bude model, který bude schopen simulovat jak vybíjení, tak nabíjení neznámé baterie a program, který bude schopen určit vnitřní parametry baterie z naměřených hodnot.

2 LI-ION ČLÁNKY

2.1 Historie

Lithium-iontové články se dnes, díky svým vlastnostem, řadí mezi nejpoužívanější elektrochemické zdroje na planetě, ale jejich historie nesahá daleko. Objevení výhod Li-Ion článků se datuje do 50.-60. let minulého století, kdy začal prvotní výzkum jejich vlastností. Brzy bylo objeveno, že Li-Ion články vynikají především svou vysokou kapacitou, nízkým samovybíjením a vysokou měrnou energií. Navíc tyto články bylo možno využít i jako akumulátory díky možnosti je dobíjet [1].

V 70. letech se vědci snažili přijít na nejvhodnější materiál na výrobu elektrod. Z počátku využívali pro kladnou elektrodu sulfidy kovů a pro zápornou elektrodu kovové lithium. Tento materiál však nebyl nejlepší, jelikož elektrody začali velmi rychle korodovat a docházelo také k pasivaci elektrod [2]. První využití představila firma SAFT v roce 1973, baterie byla však určena především pro vojenské využití, protože nebyla dostatečně bezpečná pro koncového zákazníka [1].

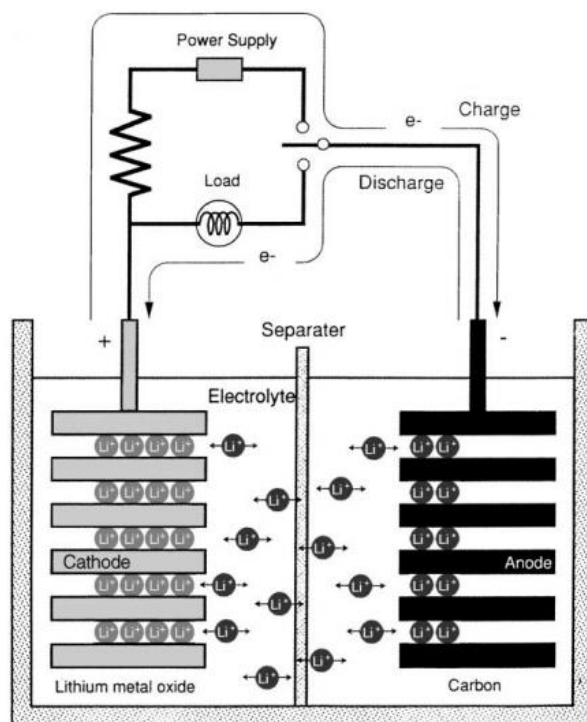
První velký skok ve výzkumu materiálů na elektrody byl představen v březnu roku 1990 na 4. Mezinárodním semináři o nabíjecích bateriích, kde japonská firma SONY představila novou technologii, kde zápornou elektrodu tvořila směs grafitu obohacená lithiem a polyolefinem.

Firma SONY byla také první, která použila název Li-Ion akumulátory a díky tomu je můžeme považovat za původce tohoto označení. Byla také první firmou, která představila komerční využití. Jejich mobilní telefon SONY Handyphone HP-211, uvedený na trh v lednu roku 1991, bylo prvním zařízením, které obsahovalo Li-Ion technologii [2].

2.2 Princip funkce

Princip funkce Li-Ion baterie je založen na přesunu iontů lithia mezi kladnou a zápornou elektrodou skrz elektrolyt, kterým bývá nejčastěji sůl rozpuštěná v několika rozpouštědlech, která určují vlastnosti elektrolytu. Mezi nejčastější elektrolyty se řadí například LiPF_6 , který se využívá díky své vysoké vodivosti iontů, na druhou stranu je však také velmi náchylný na okolní podmínky, a proto se z důvodu bezpečnosti musí

uzavírat do stabilního kovového pláště. Mezi dnes nejpoužívanější materiály na výrobu kladné elektrody můžeme zařadit LiCoO_2 , LiMn_2O_4 , LiNiO_2 a LiFePO_4 a další. Každý z daných materiálů má své výhody a nevýhody, ať už je to cena či jejich kapacita či provozní výstupní napětí [3].



Obr. 1: Princip funkce Li-Ion článku [4]

V některých textech je možné narazit na označení Li-Ion baterie jako „*rocking chair battery*“, a to díky své schopnosti pohybu iontů ve dvou směrech. [4] V průběhu procesu nabíjení se lithné ionty přesouvají z katody na anodu a během vybíjení se přesouvají z anody skrz zátěž na katodu.

V následujících rovnicích je možné vidět děje v článku během nabíjení a vybíjení, při použití LiCoO_2 jako kladné elektrody a lithia společně s uhlíkem jako záporné elektrody. V tomto případě se zde používá jako elektrolyt lithná sůl rozpuštěná v organickém elektrolytu [4].

Katoda:



Anoda:



Celkově:



2.3 Výhody a nevýhody Li-Ion článků

Pokud se podíváme na důvody dominance Li-Ion článků na trhu, tak zjistíme, že jejich výhody oproti ostatním typům článků jsou znatelné. Za jejich největší výhodu lze považovat jejich poměr hmotnosti na rozměry a následně na výkon, kde Li-Ion články dosahují velmi dobrých výsledků.

Mezi další výhody je možné zařadit také jejich vysokou kapacitu, která vychází z jejich vysoké hustoty energie, díky čemuž jsou využívány ve všech technologických odvětvích. Li-Ion články mají také velmi malý vnitřní odpor, takže úbytek napětí není tak velký jako u jiných typů.

Jejich další velkou výhodou oproti konkurenci je jejich jmenovité výstupní napětí, které dosahuje hodnot 3,6 – 3,85 V a taktéž jejich velmi malá procentuální hodnota samovybíjení, která dosahuje méně jak poloviční hodnoty samovybíjení u baterií NiCd či NiMH a díky malému samovybíjení je u nich možná dlouhá doba skladování [6].

Battery system	Estimated self-discharge
Primary lithium-metal	10% in 5 years
Alkaline	2–3% per year (7-10 years shelf life)
Lead-acid	5% per month
Nickel-based	10–15% in 24h, then 10-15% per month
Lithium-ion	5% in 24h, then 1–2% per month (plus 3% for safety circuit)

Obr. 2: Procentuální samovybíjení u různých typů baterií [5]

Pokud se podíváme na jejich nevýhody vůči jiným typům článků, tak je možné zjistit, že největším problémem a rizikem je podbití, díky čemuž musí článek obsahovat ochranný obvod, který zajišťuje odpojení článku v případě pádu napětí pod danou hranici, která bývá většinou okolo 2,5 V, podbití nastává zhruba při 2,3 V. Podbití se projevuje znehodnocením elektrod, jehož následkem může být i kompletní zničení článku [3].

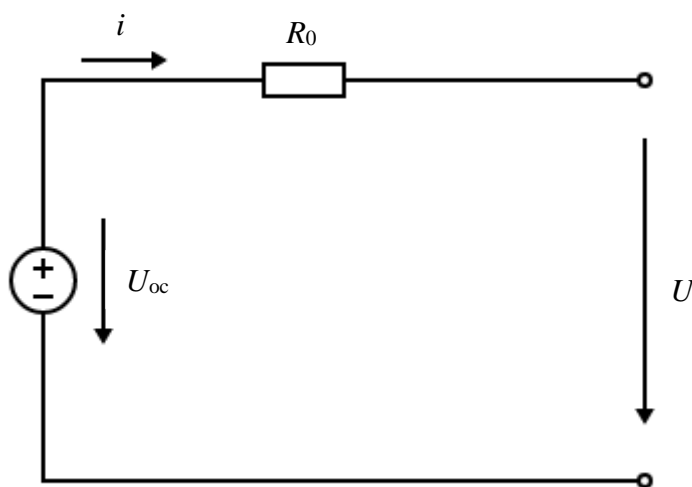
K dalším nevýhodám Li-Ion článků se řadí jejich závislost na provozních podmínkách, zvláště na teplotě, kde při nízkých teplotách články ztrácejí svou kapacitu a taktéž při vysokých teplotách mění své vlastnosti. Jako poslední nevýhodu lze uvést jejich vyšší cenu při srovnání s jinými články, či jejich problematický transport většího množství článků z důvodu bezpečnosti [6].

3 MATEMATICKÉ MODELY LI-ION ČLÁNKŮ

Testování Li-Ion článků se stalo velmi důležitou součástí vývoje modernějších článků a, jak už bylo řečeno, testování na hotových výrobcích by bylo finančně velmi náročné. Z toho důvodu je nutné článek popsat matematickým modelem, který je možné následně analyzovat a provést jeho simulaci v určitém simulačním prostředí. V této části jsou srovnány různé matematické modely a následně bude vybrán nejvhodnější model pro simulaci.

3.1 IR model

Za nejjednodušší matematický model je možné považovat IR model. Jeho označení vychází z angličtiny, kde pro vnitřní odpor je užíván pojem „*internal resistance*“. Tento model obsahuje pouze prvky R_0 , který reprezentuje vnitřní odpor, a ideální zdroj napětí U_{oc} .



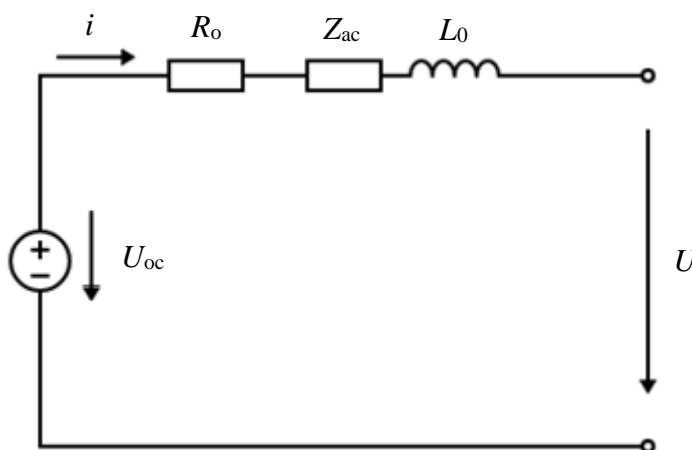
Obr. 3: Schéma ekvivalentního modelu IR [7]

Model IR lze považovat za nejjednodušší, jelikož neuvažuje žádné přechodné děje a uvažuje pouze vnitřní odpor samotného článku. V některých publikacích je možné najít, že do R_0 bývá započítáván i R_p , který reprezentuje polarizační odpor [8]. Pro popis IR modelu lze využít následující rovnici [7].

$$U = U_{oc} - R_0 \cdot i \quad (3.1)$$

3.2 Impedanční model

Impedanční model využívá elektrochemické impedanční spektroskopie pro získání střídavého impedančního modelu ve frekvenční oblasti. Tento model popisuje reálnou baterii lépe než IR model. Bohužel však neobsahuje dostatek měnitelných parametrů pro kvalitní simulaci, jelikož neumožňuje simulace při různém stavu nabití, ani pro různé teploty. Impedance Z_{ac} reprezentuje v tomto případě impedanční modul ve frekvenční oblasti a indukčnost L_o zde reprezentuje indukčnost ve frekvenční oblasti. Výhoda impedančního modelu spočívá v lepším chemickém pojetí simulace než u jiných modelů [9].

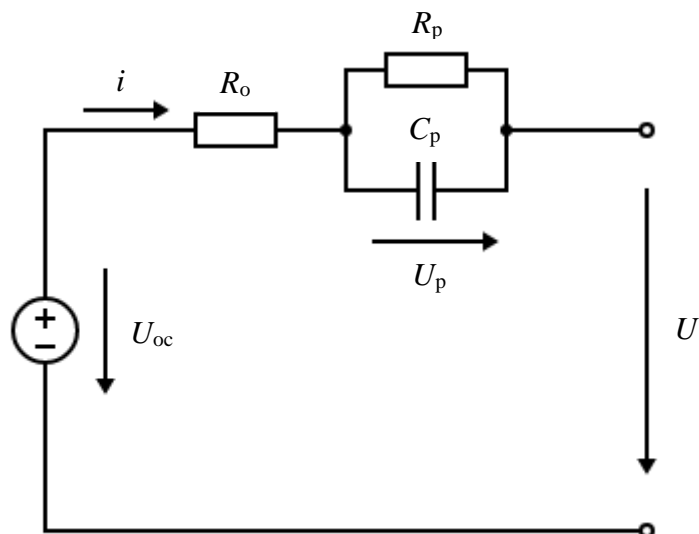


Obr. 4: Schéma ekvivalentního impedančního modelu

3.3 Theveninův model

Theveninův model vychází z klasického IR modelu, na rozdíl od IR modelu však už zahrnuje přechodné děje. Přechodné děje jsou řešeny přidáním paralelní kombinace odporu R_p a kondenzátoru C_p . S paralelní kombinací je znovu sériově spojen R_0 , který zde reprezentuje úbytek napětí na samotném vnitřním odporu. Kondenzátor C_p , přidán pro lepší popsání přechodných dějů v článku při nabíjení či vybíjení baterie, a polarizační odpor R_p , který můžeme brát jako přechodný odpor mezi elektrodami a elektrolytem při

chemické reakci na elektrodách, je zde přidán pro lepší chemickou reprezentaci modelu [9].



Obr. 5: Schéma Theveninova modelu [7]

Tak jako u IR modelu i zde je možné vidět, že výstupní napětí na baterii je rovno napětí naprázdno U_{oc} mínus úbytek na vlastním vnitřním odporu baterie a mínus úbytek na paralelní větvi znázorňující přechodné děje. Napětí naprázdno na baterii je možné správně změřit až po odeznění přechodných dějů. Rovnice pro popsání dějů na baterii v Theveninově modelu je možné vidět níže [7].

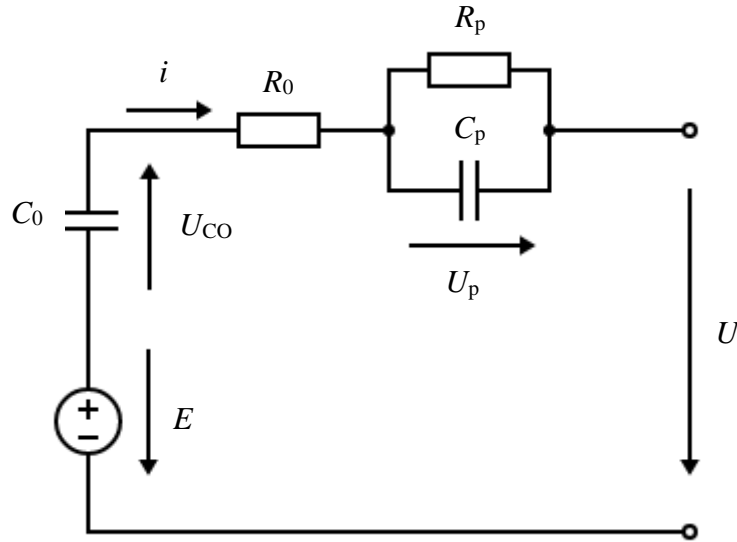
$$\dot{U}_p = -\frac{U_p}{R_p \cdot C_p} + \frac{i}{C_p} \quad (3.2)$$

$$U = U_{oc} - R_o \cdot i - U_p \quad (3.3)$$

3.4 PNGV model

PNGV model, vlastním názvem Partnership for New Generation of vehicles, který byl vyvinut v roce 2001, je model, jehož základ vychází ze základního Theveninova modelu. Stává se však přesnějším než jeho předchůdce, a to díky přidáním kondenzátoru C_0 , který znázorňuje změny napětí v baterii. PNGV model však tak jako IR a Theveninův model nedokáže popsat změnu ve výstupní napěťové charakteristice pro různé teploty okolí, různé skladovací teploty, model taktéž neuvažuje čas skladování, či různý počet nabíjecích a vybíjecích cyklů baterie a díky těmto nevýhodám není nejvhodnějším modelem pro testovací simulace.

Na následujícím schématu lze vidět ekvivalentní obvod pro matematický model PNGV, kde, tak jako v Theveninově modelu, je R_0 popsán jako vnitřní odpor baterie, paralelní kombinace kondenzátoru C_p a odporu R_p znázorňuje polarizaci a přechodné děje v baterii. Zde přidáný kondenzátor C_0 popisuje změny napětí, tak jak bylo popsáno výše v článku. Napětí na kondenzátoru C_0 je bráno jako převrácená hodnota napětí U_{oc} , které je označené ve schématu symbolem E [10].



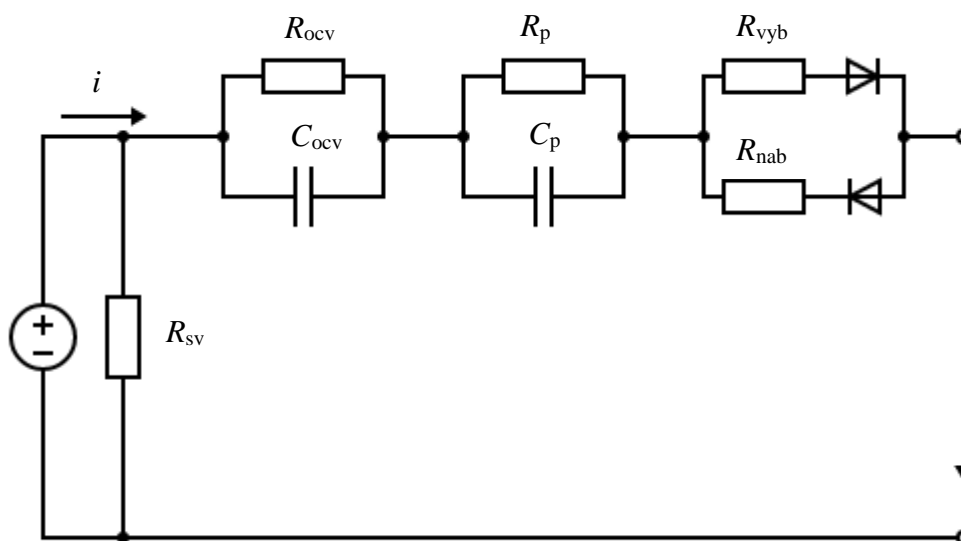
Obr. 6: Schéma obvodu PNGV modelu [10]

Pro popsání PNGV modelu lze využít následujících rovnic [7].

$$\dot{U}_p = -\frac{U_p}{R_p \cdot C_p} + \frac{i}{C_p} \quad (3.4)$$

$$U = E - U_{C0} - U_p - i \cdot R_0 \quad (3.5)$$

Jelikož je PNGV model zatížen relativně velkou chybou měření, byla vyvinuta jeho vylepšená verze pod názvem Pokročilý PNGV model, do kterého pro snížení chyby byly přidány další dvě paralelní RC větve pro zvýšení přesnosti odezvy na různé procházející proudy. Další úpravou bylo také přidání odporu pro znázornění samovybíjení R_{sv} a taktéž byl vnitřní odpor rozdělen diodami na dvě větve, jelikož vnitřní odpor baterie se liší pro nabíjení R_{nab} a vybíjení R_{vyb} . Pro ještě větší přesnost se na výpočet stavu nabití (state-of-charge - SOC) využila Peukertova konstanta, která udává závislost kapacity baterie na vybíjecím proudu. Výsledný obvod je možné vidět na Obr. 7 [12] [13].

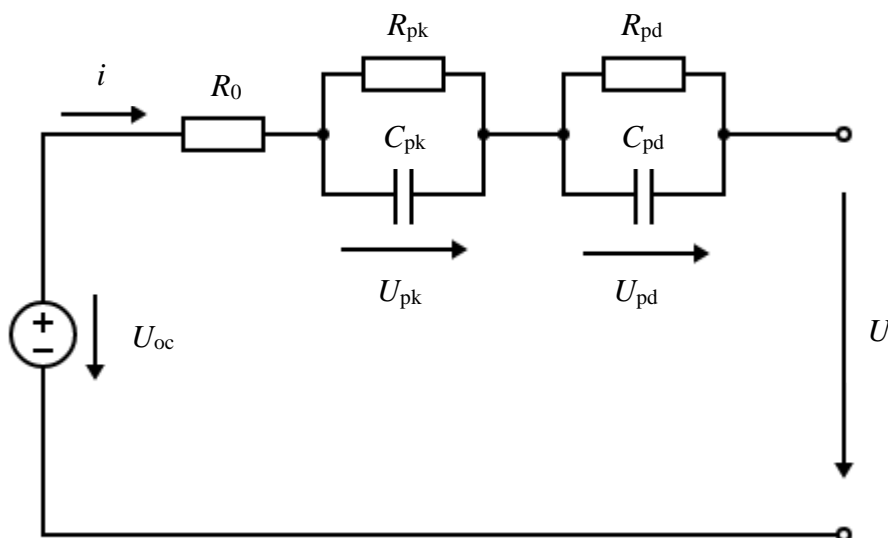


Obr. 7: Schéma obvodu Vylepšeného PNGV modelu

3.5 Vylepšený Theveninův model

Theveninův model samotný byl představen v kapitole 3.3 a jak bylo uvedeno v kapitole 3.4, Theveninův model a všechny modely s jednou RC větví nepokrývají dlouhodobé přechodné jevy. Dalším problémem, který doposud nebyl zmíněn, je také rozdílné chování mezi krátkodobými a dlouhodobými přechodnými ději v článku v době, kdy je článek nezatížený. Z toho důvodu byl vyvinut vylepšený Theveninův model, který přidává druhou RC větev a snaží se pokrýt nepřesnosti vzniklé rozdílným chováním dlouhodobých a krátkodobých přechodných dějů.

Samotný ekvivalentní obvod se tedy skládá z odporu R_o , který značí vnitřní odpor článku, a ze dvou paralelních kombinací odporu a kondenzátoru. První větev, obsahující elektrochemický polarizační odpor R_{pk} a elektrochemický polarizační kondenzátor C_{pk} , reprezentuje odpor a kapacitu přechodného děje mezi elektrodami a elektrolytem. Druhá větev se skládá z koncentračně polarizačního odporu R_{pd} a koncentračně polarizačního kondenzátoru C_{pd} . Tato větev znázorňuje odpor a kapacitu přechodného děje při průchodu proudem elektrolytem, který způsobuje změny v koncentraci elektrolytu na rozhraní elektrod a elektrolytu [11].



Obr. 8: Schéma obvodu Vylepšeného Theveninova modelu [11]

Ze schématu je možné vidět, že všechny modely vychází z nejzákladnějšího IR modelu a pouze ho upravují pro větší podobnost s reálným Li-Ion článkem. Tak jako u předchozích modelů i tento lze popsat rovnicemi, které jsou k vidění níže.

$$U_{pk} = -\frac{U_{pk}}{R_{pk} \cdot C_{pk}} + \frac{i}{C_{pk}} \quad (3.6)$$

$$U_{pd} = -\frac{U_{pd}}{R_{pd} \cdot C_{pd}} + \frac{i}{C_{pd}} \quad (3.7)$$

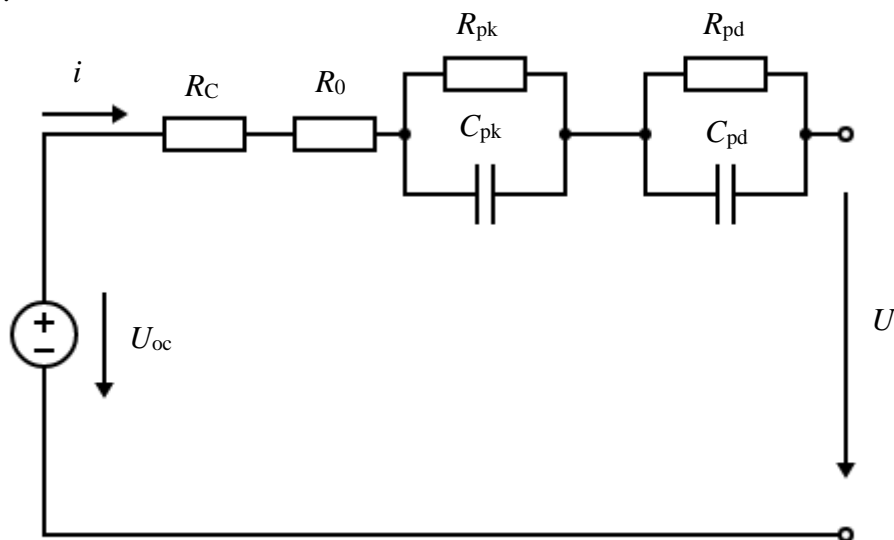
$$U = U_{OC} - U_{pk} - U_{pd} - R_0 \cdot i \quad (3.8)$$

Tak jako u všech předchozích modelů ani Vylepšený Theveninův model neuvažuje primárně do své výstupní charakteristiky teplotní vlivy či vliv skladování, a proto i tento model je zatížen chybou která se s rostoucím stářím článku stále zvyšuje, jelikož článek nedosahuje už takové kapacity jako když byl nový. Zahrnutí teplotních vlivů by bylo možné v případě identifikace parametrů v závislosti nejen na SOC, ale taktéž na teplotě.

3.6 Upravený Theveninův model s dvěma paralelními větvemi

Jako poslední model bude představen upravený Theveninův model s dvěma paralelními větvemi. S tímto modelem přišli v roce 2009 Ozan Erdiñç, Bulent Vural a Mehmet Uzunoğlu, tento model upravuje Vylepšený Theveninův model tím, že obsahuje prvky, které se snaží o reprezentaci nejen krátkodobých a dlouhodobých přechodných

dějů, ale i o reprezentaci teplotních vlivů a o reprezentaci klesání kapacity používáním baterie.



Obr. 9: Schéma Upraveného Theveninova modelu

Díky náchylnosti baterií vůči velkému množství parazitních činitelů ovlivňujících kapacitu samotného článku, je nutné testovat vyvíjené baterie na ztrátu kapacity, aby byla správně určena doba jejich životnosti. Baterie se dnes považují za funkční do té doby, než ztratí 20 % své původní kapacity. Ztráta kapacity baterie se dle Vural a Uzunoğlu děje ve dvou stavech. Ve stavu, kdy je baterie nečinná, jsou tyto ztráty označeny za „kalendářní ztráty“ a ve stavu kdy je baterie aktivní jsou označeny tyto ztráty za „ztráty cyklů“.

Při vyjádření procentuální ztráty kapacity v „kalendářních ztrátách“, značené $\%_K$, je možno zjistit, že u tohoto modelu by ztráta činila přibližně 15 % za rok, a to za předpokladu, že by baterie byla skladována při 25 °C. Proměnná t_m zde reprezentuje čas skladování v měsících. Tuto procentuální ztrátu kapacity lze zjistit z následující rovnice [14].

$$\%_K = a_0 \cdot e^{\left(\frac{a}{b \cdot T}\right)} \cdot t_m \quad (3.9)$$

Druhý typ ztráty „ztráty cyklů“, které jsou označeny $\%_C$, jsou zodpovědné za ztráty při fungování baterie a taktéž jsou velmi závislé na teplotě prostředí. „Ztráty cyklů“ vznikají opotřebením záporné elektrody a díky tomu je taktéž závislá na množství proběhlých cyklů. Vyjádření tohoto typu ztrát kapacit je vidět níže.

$$\frac{d\theta}{dN} = k_1 \cdot N + k_2 \quad (3.10)$$

V této rovnici k_1 označuje koeficient pro ztráty při cyklech při vysoké teplotě a k_2 označuje ztráty při cyklech za normálních podmínek. Oba dva koeficienty lze zjistit z Tabulka 1. Posledním členem v této rovnici je N , které označuje počet cyklů za vysoké teploty.

V případě znalosti obou dvou typů ztrát, je možné určit korekční člen CCF pro použitelnou kapacitu baterie.

$$CCF = 1 - \frac{\%K + \%C}{100} \quad (3.11)$$

Ze znalosti korekčního členu a původní kapacity C_{pu} je možné následně jednoduše určit použitelnou kapacitu C_{po} , se kterou lze následně počítat.

$$C_{po} = CCF \cdot C_{pu} \quad (3.12)$$

Tabulka 1: Koeficienty pro výpočet korekčního členu a R_c pro různé teploty [14]

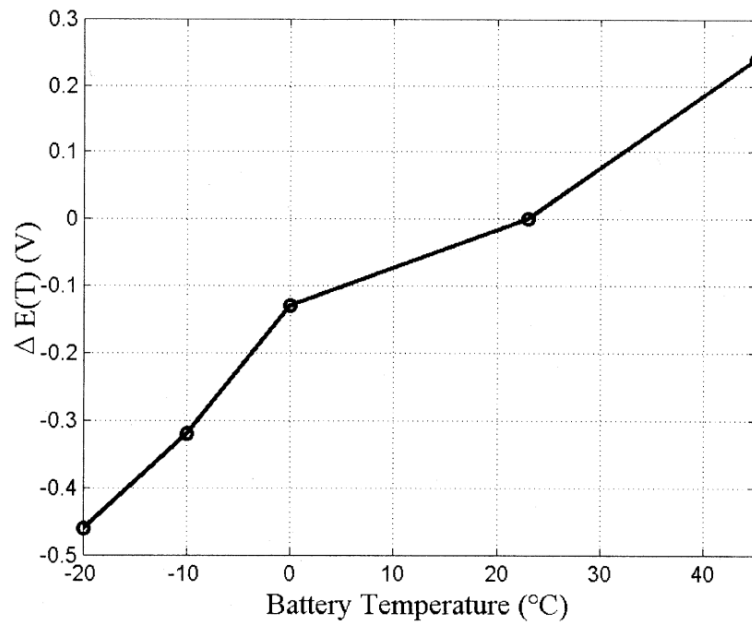
Teplota [°C]	k_1 [cyklus ⁻²]	k_2 [cyklus ⁻¹]	k_3 [Ω/cyklus ^{1/2}]
25	$8,5 \cdot 10^{-8}$	$2,5 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$
50	$1,6 \cdot 10^{-8}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-3}$

Dalším členem, kterým se liší tento model od Vylepšeného Theveninova modelu, je odpor R_c , který znázorňuje účinky používání baterie a její postupné zvyšování odporu, který je závislý na množství cyklů. Pro jeho popsání využíváme rovnice (3.13).

$$R_c = k_3 \cdot \sqrt{N} \quad (3.13)$$

Koeficient k_3 zde funguje jako teplotní koeficient a jeho hodnota roste s rostoucí teplotou a díky tomu můžeme říci, že odpor R_c bude růst, pokud bude růst počet cyklů baterie nebo pokud se bude zvyšovat teplota v jaké probíhají cykly baterie. Teplotní koeficient lze zjistit z Tabulka 1. [14]

V případě, že bychom chtěli zahrnout také korekční člen, který by zahrnoval změnu výstupního napětí v závislosti na změně teploty, mohli bychom vycházet z práce Lijun Gao, Shengyi Liu a R.A. Dougal. V této literatuře lze najít určení korekce výstupního napětí v závislosti na teplotě pro Li-Ion baterii Sony US18650 tak, jak ji lze vidět na Obr. 10 [15].



Obr. 10: Teplotně závislá napět'ová korekce [15]

Zhodnocením reálné věrohodnosti tohoto modelu lze zjistit, že výše uvedené vztahy a závěry nejsou nejvhodnější pro modelování dynamického modelu, jelikož všechny tyto parametry jsou velmi individuální pro každý článek. Klesání použitelné kapacity z důvodu rostoucího počtu cyklů je velmi častý jev a je také podrobně otestován. Na druhou stranu jev klesání kapacity vlivem skladování je velmi závislý na stavu nabití, na kterém je baterie skladována, což v rovnicích výše není zohledněno.

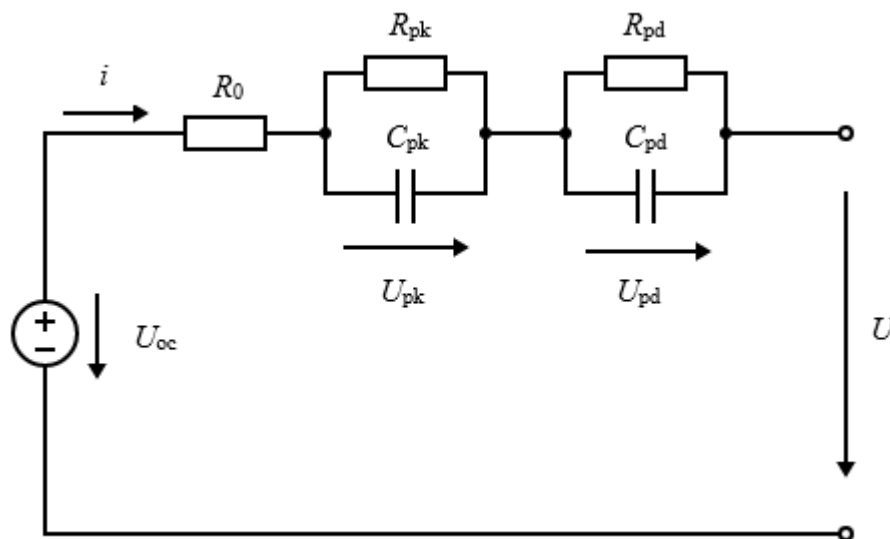
Tak jak bylo uvedeno výše, tyto ztráty jsou individuální pro každý článek, a proto tento model nebude použit pro vytvoření dynamického modelu.

3.7 Vybrané matematické modely pro tvorbu v Simulink

Vybranými matematickými modely pro tvorbu dynamického modelu byly nakonec zvoleny Vylepšený Theveninův model, společně s klasickým Theveninovým modelem. Oba dva modely mají stejný základ. Složitější model s dvěma paralelními větvemi bude označován jako Vylepšený Theveninův model a jednodušší model s jednou paralelní větví jako Theveninův model. Teoreticky by přesnost měla být větší u Vylepšeného Theveninova modelu, z důvodu přidání jedné paralelní RC větve, která simuluje dlouhodobé přechodové děje. Právě z důvodu přesnosti, budou vytvořeny dva modely, které budou srovnány mezi sebou. Primárně bude vytvořen pouze složitější model

s dvěma paralelními větvemi. Jednodušší model lze potom dostat odstraněním druhé větve.

Pokud se podíváme na náhradní schéma vybraného modelu můžeme vidět, že se skládá z 6 prvků. Každý prvek je možné popsat rovnicí, ve které je hodnota prvku závislá pouze na stavu nabití.



Obr. 11: Schéma obvodu Vylepšeného Theveninova modelu [11]

Napětí na svorkách je velmi závislé na stavu nabití baterie (SOC), díky čemuž můžeme vyjádřit výstupní napětí baterie v závislosti na stavu nabití. Tento vztah je popsán následující rovnicí, kde SOC nabývá hodnoty 0 až 1, reprezentující 0–100 % stavu nabití [14].

$$U_{oc}(SOC) = a_0 + a_1 \cdot SOC + a_2 \cdot SOC^2 + a_3 \cdot SOC^3 + a_4 \cdot e^{a_5 \cdot SOC} \quad (3.14)$$

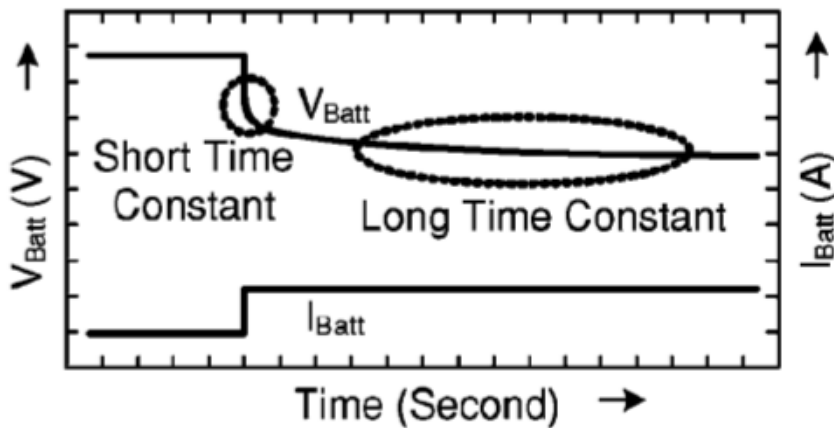
Na Obr. 26 je možné vidět grafické znázornění závislosti výstupního napětí na SOC. Dalším vlivem, který je nutné zmínit, je změna průběhu U_{oc} pro nabíjení a vybíjení baterie. Při nabíjení baterie je dosahováno vyšších hodnot U_{oc} než při vybíjení, ale rozdíl není až tak markantní, a proto nebude v této práci uvažován [19].

Jelikož hodnoty všech prvků v uvažovaném modelu jsou závislé na stavu nabití, je zapotřebí spočítat stav nabití po nějakém čase. Stav nabití je závislý na kapacitě baterie a zároveň na velikosti vybíjecího proudu. Rovnici popisující tento vztah lze vidět níže [15].

$$SOC = SOC_0 - \int \frac{I}{C_{po}} dt \quad (3.15)$$

Pokud je známý SOC, tak je možné následně popsat každý prvek vybraného modelu jako rovnici o jedné proměnné, kterou je stav nabití. S těmito rovnicemi přišli v roce 2006 Min Chen a Gabriel A. Rincón-Mora, kteří provedli měření na 850 mAh TCL PL-383562 Li-Ion baterii pro různé pulsní vybíjecí proudy. Jejich rovnice při srovnávání s reálným výsledkem dosahovaly chyby méně než 2 % [9].

Tak jak už bylo popsáno, model obsahuje dvě paralelní RC větve. První větev, která sleduje časově krátké přechodné děje, je označována jako krátká časová konstanta. Druhá větev sleduje časově dlouhodobější přechodné děje a je díky tomu označována jako dlouhá časová konstanta. Společně popisují časovou odezvu na jednotkovém skoku vybíjecího proudu tak jak lze vidět na Obr. 12.



Obr. 12: Odezva na skok na vybíjecím proudu [9]

Tyto dvě větve je možné popsat následujícími rovnicemi, kde R_{pk} a C_{pk} jsou pro krátkou časovou konstantu a R_{pd} a C_{pd} pro dlouhou časovou konstantu.

$$R_{pk}(SOC) = a_0 + a_1 \cdot e^{b \cdot SOC} \quad (3.16)$$

$$C_{pk}(SOC) = a_0 + a_1 \cdot e^{b \cdot SOC} \quad (3.17)$$

$$R_{pd}(SOC) = a_0 + a_1 \cdot e^{b \cdot SOC} \quad (3.18)$$

$$C_{pd}(SOC) = a_0 + a_1 \cdot e^{b \cdot SOC} \quad (3.19)$$

Posledním prvkem náhradního schématu je R_0 , který způsobuje pokles výstupního napětí na vnitřním odporu baterie. Pro popsání tohoto děje můžeme znovu využít rovnici, která je závislá pouze na stavu nabití [9].

$$R_0(SOC) = a_0 + a_1 \cdot e^{b \cdot SOC} \quad (3.20)$$

Všechny tyto rovnice jsou velmi individuální a záleží na samotném proložení funkce. Výpočet koeficientů pro samotné proložení bude náplní další části této práce.

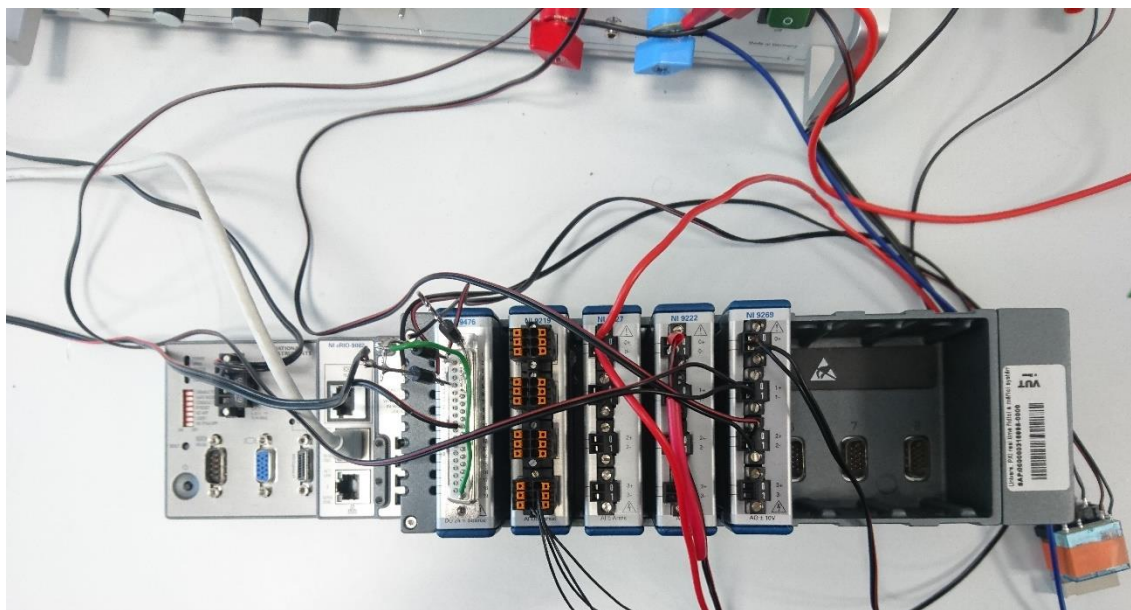
4 IDENTIFIKACE PARAMETRŮ

V této části práce bude představeno měření, měřicí přístroje, zpracování dat a identifikace parametrů v programu Matlab. Data, která byla využita v této části, byla obdržena od vedoucího práce. Reálná data budou následně využita pro srovnání s výsledky simulací modelu.

4.1 Měření na Li-Ion článku

Měření lithium – iontového článku proběhlo pomocí software LabVIEW. Je to software, či programovací prostředí, vyvíjený firmou National Instruments (NI), který vznikl v roce 1983. Používá se pro aplikace, ve kterých je vyžadováno testování, měření a řízení s rychlým přístupem k hardwarovým a datovým informacím.

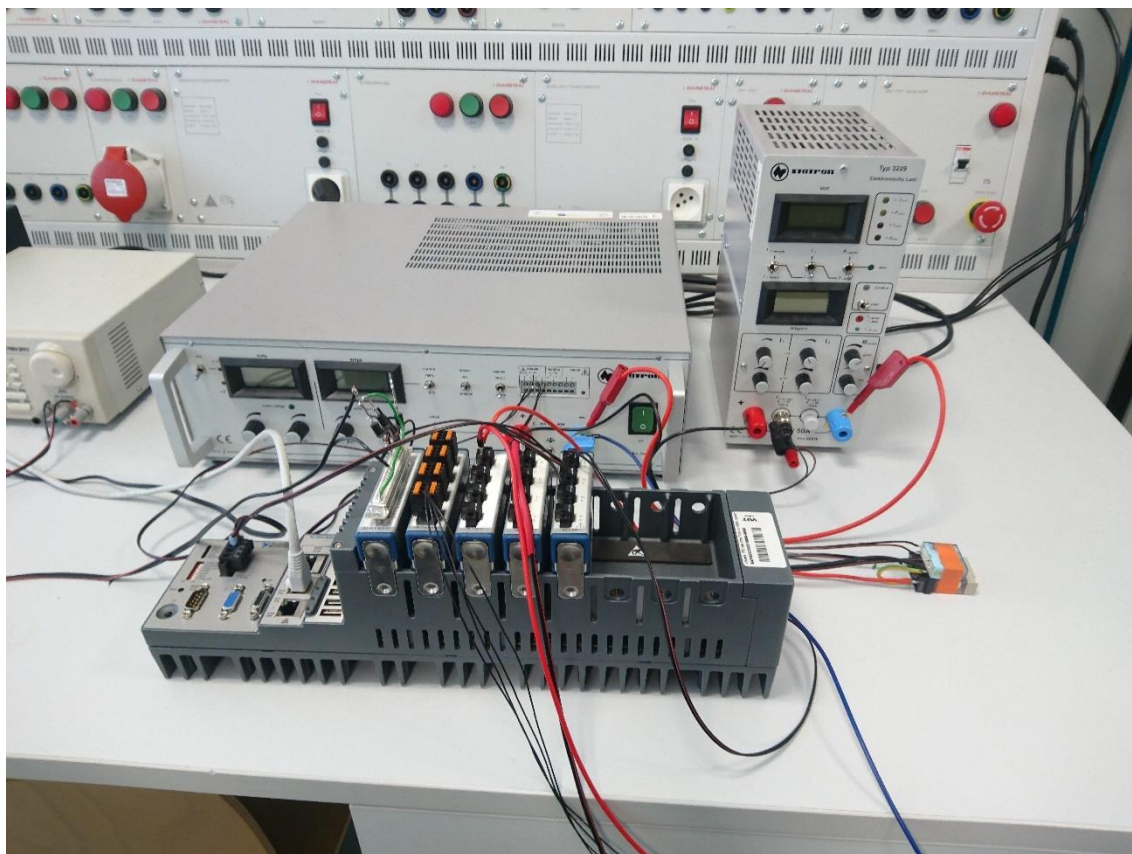
Tento software komunikoval s řídicí jednotkou NI CompactRIO-9082. Je to jednotka, která je charakteristická výkonným dvoujádrovým procesorem Intel Core i7, díky kterému zvládá náročné výpočty. Komunikace této jednotky je se softwarem LabVIEW či s operačním systémem Microsoft WES7. Tato řídicí jednotka byla osazena několika kartami a to NI – 9476, NI – 9219, NI – 9227, NI – 9222, NI – 9269. Karty snímaly různé veličiny, či byly použity jako výstupní karty pro regulaci zátěže apod.



Obr. 13: Řídicí jednotka NI-cRIO-9082 s kartami snímající teplotu, napětí a proud

Pro nás nejdůležitější bylo snímání teploty, napětí a proudu testovaného článku a zaznamenávání hodnot v LabVIEW [17].

Tato řídicí jednotka, společně s celou měřicí soustavou, byla napájena z laboratorního stolu a samotný měřený článek byl nabíjen z laboratorního zdroje STATRON 3256.1., který byl řízen programem LabVIEW. Jako elektronická zátěž bylo poté použito zařízení STATRON 3229.0.



Obr. 14: Měřicí soustava

Měřená baterie byla umístěna v tepelné komoře MEMMERT UF30. Jednotlivé testy byly prováděny při různých teplotách. Samotný měřený článek byl 3500mAh Li-ion 18650 značky Panasonic.

4.2 Zpracování naměřených dat

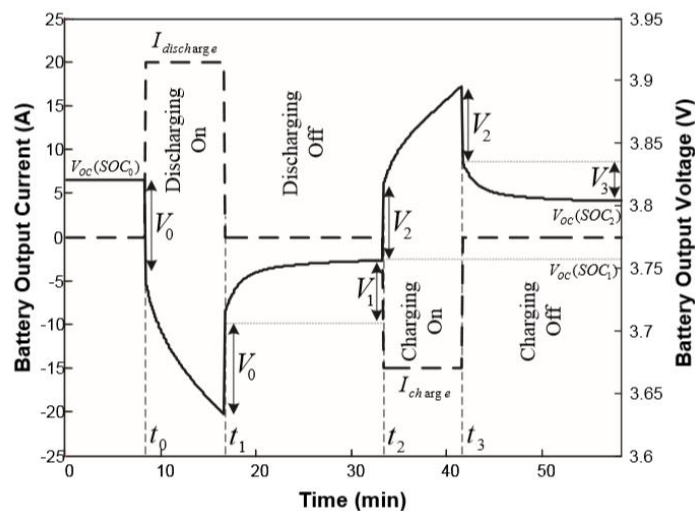
Data, která byla naměřená na měřicí soustavě popsané výše, byla zaznamenána pomocí software LabVIEW do souborů, datového typu s koncovkou .lvm. Tyto data byly následně naimportovány do programu Matlab a nahrány do struktury, ze které byly následně složeny v jeden průběh vybíjení či nabíjení.

```
close all
clear all
format long
tic

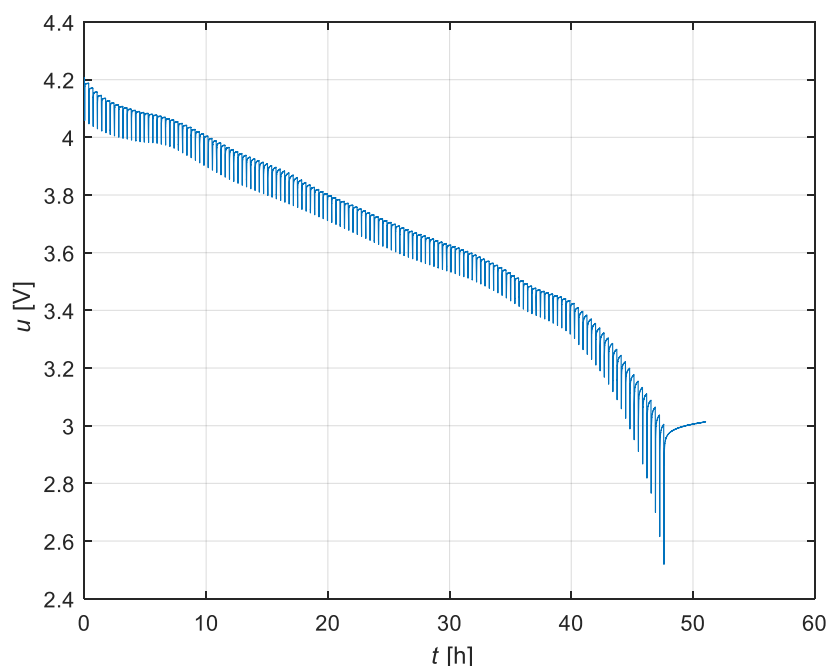
files = dir('*.lvm');
for i=1:length(files)
    [fid(i),msg]=fopen(files(i).name);
    disp(msg);
    files(i).values=textscan(fid(i), '%f %f %f %f %f', 'headerlines', 22);
    fclose(fid(i));
end
```

Obr. 15: Nahrání do struktury MATLAB

Z těchto průběhů je zapotřebí určit vnitřní parametry každého prvku náhradního schématu jak jednoduššího modelu, viz Obr. 5, tak složitějšího modelu, viz Obr. 8, a to pro každý stav nabití. Výše popsané měření probíhalo pro několik podmínek, jak pro různé teploty, tak pro různé průběhy vybíjecích proudů. Pro výpočet parametrů prvků náhradního schématu bylo využito průběhu pulsního vybíjení pro vybíjecí proud 1,5 A. Vybíjení probíhalo vždy po dobu jedné minuty a poté se nechala baterie 20 minut ustálit.



Obr. 16: Průběh nabíjení a vybíjení baterie pro určení vnitřních parametrů [16]



Obr. 17: Průběh napětí při pulsním vybíjení Li-ion článku

Na obrázku je možné vidět průběh pulsního vybíjení baterie popsané výše. Pro správné určení jejích parametrů je nezbytné každý jednotlivý vybíjecí cyklus separovat a proložit funkcí. Pro proložení funkcí je pro nás nejdůležitější část grafu na Obr. 16 mezi časy t_1 a t_2 , popřípadě t_3 a t_4 . V tomto časovém úseku je baterie nezatížená a lze na ní určit její parametry.

Pro správnou separaci průběhu vybíjení bylo využito naměřených hodnot proudu, díky čemuž bylo možné separovat cykly na základě velikosti okamžitého proudu. Tohoto bylo ve skriptu dosaženo jednoduchou podmínkou „if“, tak jak je možné vidět na Obr. 18.

Pro určení parametrů je nutné každý jednotlivý průběh zvlášť proložit křivkou, tak jak bylo uvedeno výše. Zde je možné vidět rozdíl mezi matematickým modelem s jednou paralelní RC větví a modelem s dvěma paralelními větvemi. Jednodušší model je proložen exponenciální funkcí [16].

$$f(t) = A + B \cdot e^{-\alpha \cdot t} \quad (4.1)$$

Složitější model s dvěma paralelními větvemi se prokládá taktéž exponenciální funkcí ve tvaru [16].

$$f(t) = A + B \cdot e^{-\alpha \cdot t} + C \cdot e^{-\beta \cdot t} \quad (4.2)$$

Pro proložení byla využita část programu Matlab, a to nástroj „*cftool*“, neboli „*curve fitting toolbox*“ která umožňuje prokládání dat libovolnou funkcí. Problémem však bylo, že Matlab ne vždy byl schopen nalézt řešení dané exponenciální funkce. Z toho důvodu byl implementován příkaz „*try,catch*“, který umožňuje Matlabu při výpočtu nejprve vyzkoušet, zda bude řešení konvergovat, a pokud ne, potom automaticky přeskočí k dalšímu vybíjecímu cyklu, tak jak lze vidět na obrázku níže.

```

index = 1;
koeficienty = zeros(1000,5);
for i_fit = 50:1:length(I)
    rozdíl_fit = I(i_fit)-I(i_fit-1);
    if rozdíl_fit>1
        k_u3= i_fit-1;

    elseif rozdíl_fit<-1
        k_u4 =i_fit-1;
        u_prov = u(k_u3:k_u4);
        t_prov2 = 0.1:0.1:(length(u_prov)/10);
        t_prov2 = t_prov2.';
        try vysledek_fit = createFit(t_prov2,u_prov);
            koeficienty(index,1:5) = coeffvalues(vysledek_fit);

            SOC_fit(index) =1-((abs(trapz(t(1:i_fit),I(1:i_fit)))/3600)/3.5);
            R0(index) = ((u(k_u3+1)-u(k_u3))/1.5);
            Voc_SOC1(index) = koeficienty(index,1);
            Vttc1(index) = koeficienty(index,2);
            Vttc2(index) = koeficienty(index,3);
            tau_TTC1(index) = 1/(koeficienty(index,4));
            tau_TTC2(index) = 1/(koeficienty(index,5));
            Rttc1(index) = abs(Vttc1(index)/((1-exp(-60/tau_TTC1(index)))*1.5));
            Rttc2(index) = abs(Vttc2(index)/((1-exp(-60/tau_TTC2(index)))*1.5));
            Cttc1(index) = abs(tau_TTC1(index)/Rttc1(index));
            Cttc2(index) = abs(tau_TTC2(index)/Rttc2(index));
            V_batt(index) = Voc_SOC1(index)-Vttc1(index)*exp(-((1200)/10)/tau_TTC1(index))-Vttc2(index)*exp(-((1200)/10)/tau_TTC2(index))-R0(index)*1.5;
            index = index+1;
        catch
            continue;
        end
    else
        end
end
end

```

Obr. 18: Výpočet parametrů

Rovnice, které lze vidět ve skriptu výše, vycházejí z křivky, kterou byl proložen každý vybíjecí cyklus. V tomto případě byl brán v potaz složitější model. Každý vybíjecí cyklus můžeme popsat také rovnicí, který určuje úbytky na jednotlivých větvích. Tato rovnice platí pro úsek mezi časy t_1 a t_2 , který můžeme vidět na Obr. 16 [16].

$$U = U_{oc} - U_{pk}(t_1) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{pk}}} - U_{pd}(t_2) \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{pk}}} \quad (4.3)$$

Tyto rovnice, vycházející z [16], popisují každý z parametrů matematického modelu Li-ion článku. Vliv vnitřního odporu je patrný na Obr. 16 jako okamžitý úbytek výstupního napětí při vybíjení vybíjecím proudem I a je označen jako V_0 . Z těchto dvou hodnot je možné využitím Ohmova zákona určit velikost vnitřního odporu pro určitý stav nabití (SOC).

$$R_0 = \frac{V_0}{I} \quad (4.4)$$

Pro určení vnitřního odporu při nabíjení by bylo možné využít také rovnice (4.4), bylo by však nutné uvažovat polaritu jak úbytku napětí, tak nabíjecího proudu.

Z koeficientů, které byly spočítány ve výše zmíněném skriptu, lze následně určit základní parametry. Koeficient A odpovídá hodnotě ustáleného napětí před započítáním vybíjení nebo nabíjení a popisuje napětí naprázdno v závislosti na stavu nabití.

$$U_{oc}(SOC) = A \quad (4.5)$$

Koeficienty B či C , znázorňující úbytky napětí při krátkodobém či dlouhodobém přechodném ději.

$$U_{pk}(SOC) = B \quad (4.6)$$

$$U_{pd}(SOC) = C \quad (4.7)$$

Posledními koeficienty, které byly vypočítány ve skriptu jsou koeficienty α a β , které zastupují, tak jak je možné vidět v rovnici (4.3), časové konstanty pro přechodné děje.

$$\tau_{pk}(SOC) = \frac{1}{\alpha} \quad (4.8)$$

$$\tau_{pl}(SOC) = \frac{1}{\beta} \quad (4.9)$$

Díky znalosti těchto základních veličin bylo možné určit velikosti odporů a kapacit pro různé stavy nabití. Stav nabití, neboli SOC , byl určen pro každý vybíjecí či nabíjecí cyklus zvlášť, a to pomocí lichoběžníkové metody, tato metoda je v programu Matlab označena příkazem „trapz“. Tento příkaz provádí numerickou integraci na zadaném intervalu, pomocí integrování okamžité hodnoty proudu od počátku měření až do námi zadaného času. Tato metoda nám dá hodnotu odebrané energie z baterie po každém cyklu a díky tomu je možné přiřadit koeficienty a parametry baterie pro přesný stav nabití.

Touto metodou byla určena i celková kapacita baterie a taktéž procentuální hodnota nabití do které byla baterie vybíjena.

Výpočet samotných hodnot odporů a kapacit proběhl taktéž ve výše zmíněném skriptu a rovnice pro tento výpočet je možné vidět níže.

$$R_{pk}(SOC) = \frac{U_{pk}(SOC)}{\left(\frac{-T_v}{1 - e^{\frac{-T_v}{\tau_{pk}(SOC)}}} \right) \cdot i(t)} \quad (4.10)$$

$$R_{pd}(SOC) = \frac{U_{pd}(SOC)}{\left(\frac{-T_v}{1 - e^{\frac{-T_v}{\tau_{pd}(SOC)}}} \right) \cdot i(t)} \quad (4.11)$$

Tyto rovnice popisují výpočet velikosti odporů v jednotlivých paralelních větvích matematického modelu a jsou aplikovatelné i na výpočet velikosti odporů pro nabíjecí cykly. Změní se pouze hodnota proudu $i(t)$ a časový interval vybíjení T_v bude změněn na časový interval nabíjení. Časový interval T_v je možné určit jako rozdíl časů t_1 a t_0 , či v rámci nabíjení jako rozdíl t_3 a t_2 . V tomto měření byla hodnota vybíjecího času T_v shodná s hodnotou nabíjecího času a to 60 sekund. Jelikož tento čas byl konstantní, byla i proměnná vybíjecího času nahrazena ve skriptu konstantou.

Jelikož časová konstanta se dá nahradit součinem kapacity a odporu, můžeme pro výpočet kapacity uvažovat, že kapacita v jedné paralelní větvi je rovna podílu časové konstanty pro danou větev a jejího odporu [16].

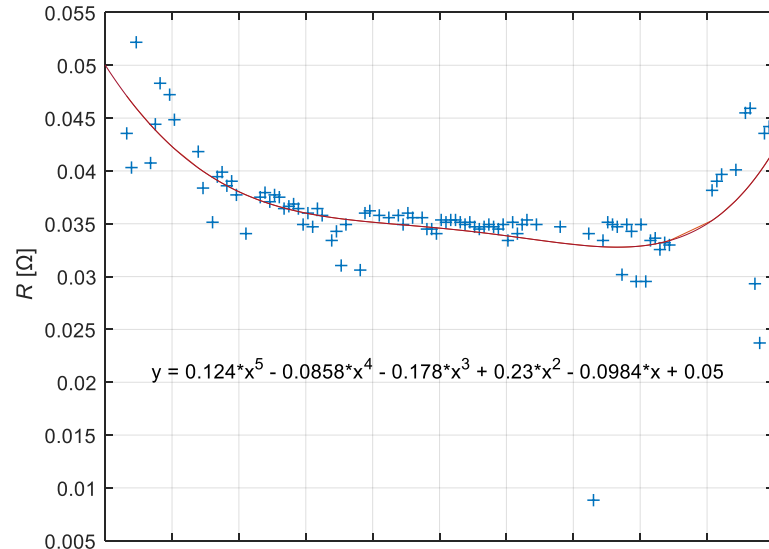
$$C_{pk}(SOC) = \frac{\tau_{pk}(SOC)}{R_{pk}(SOC)} \quad (4.12)$$

$$C_{pd}(SOC) = \frac{\tau_{pd}(SOC)}{R_{pd}(SOC)} \quad (4.13)$$

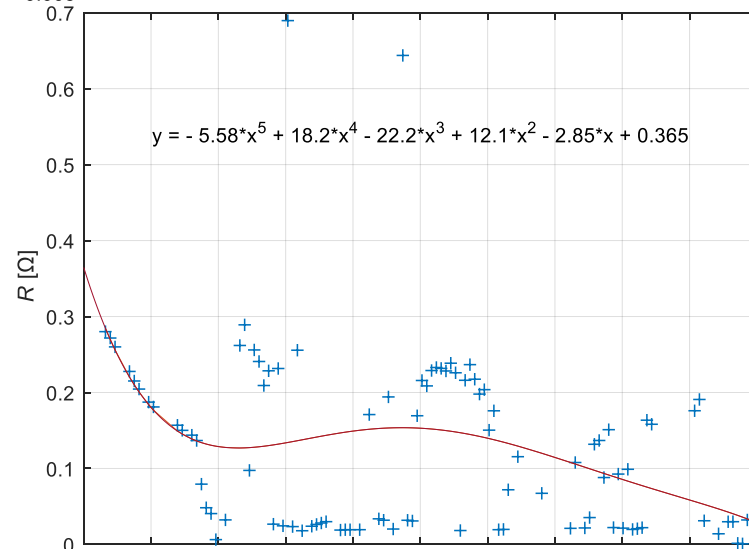
V případě, že uvažovaný matematický model obsahuje pouze jednu paralelní větev pro přechodné děje, rovnice se zjednoduší, jelikož daný model bude obsahovat pouze jednu časovou konstantu. V tomto případě prokládáme daný graf rovnicí (4.1). Jelikož výsledkem proložení jsou pouze tři koeficienty, z důvodu vynechání dlouhodobých dějů, druhá časová konstanta se neuvažuje a systém popisujeme pouze pomocí rovnic (4.4), (4.5), (4.6), (4.8), (4.10) a (4.12).

Výsledkem zpracování dat jsou průběhy vypočtených parametrů baterie, které je možné vidět níže jak pro složitější verzi modelu, viz Obr. 8, tak pro zjednodušenou verzi, viz Obr. 5. V každém grafu je taktéž vložen prokládací polynom pátého stupně.

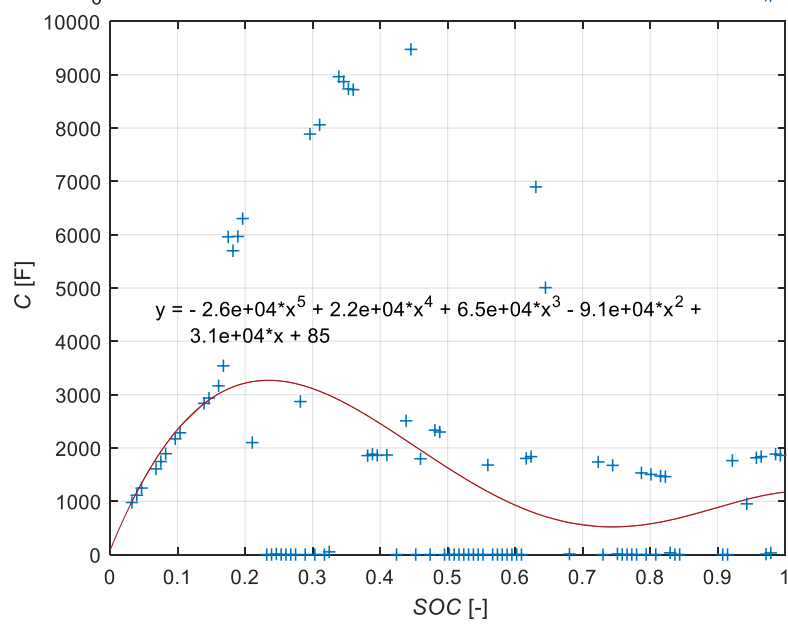
R_0 :



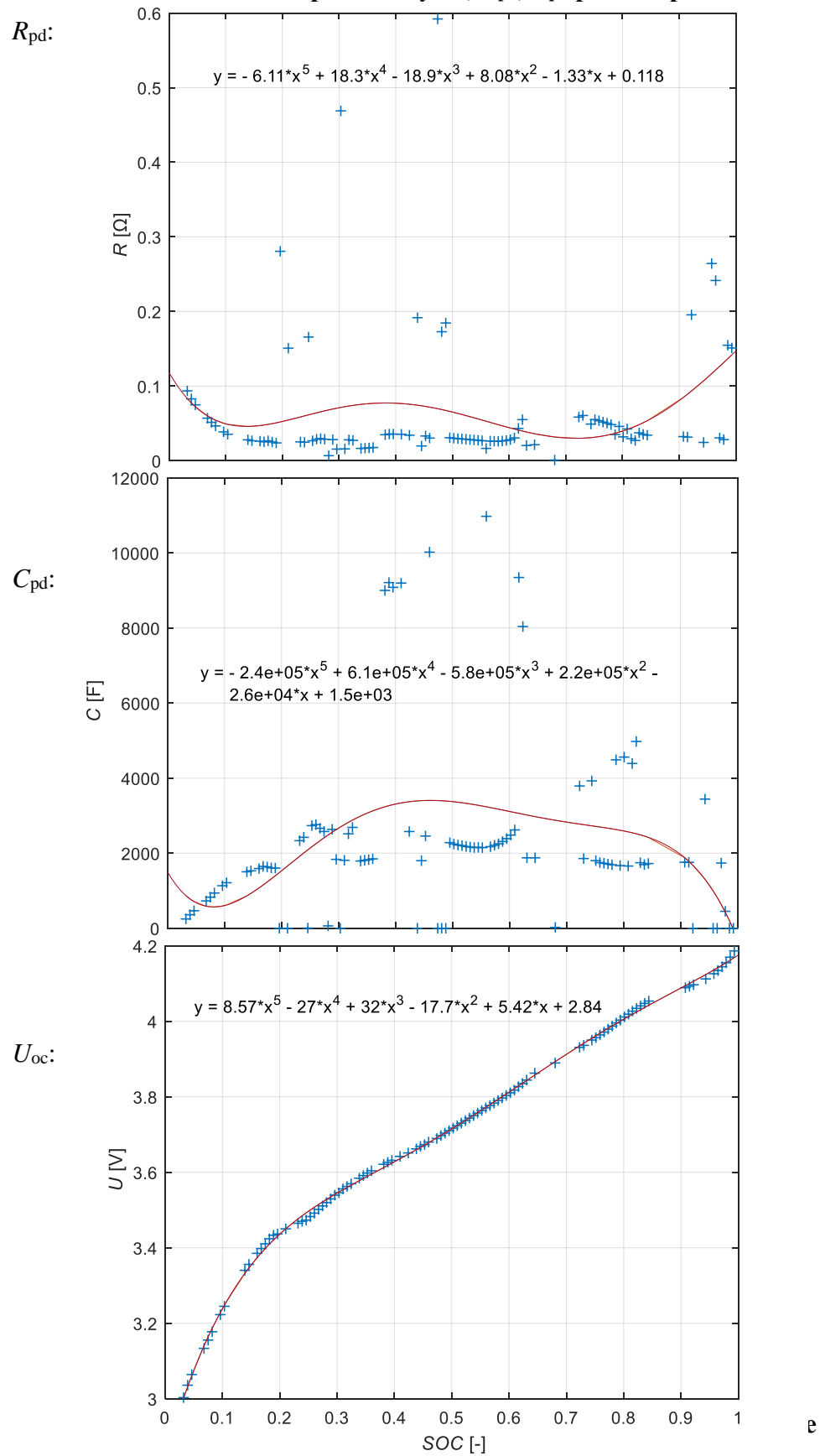
R_{pk} :

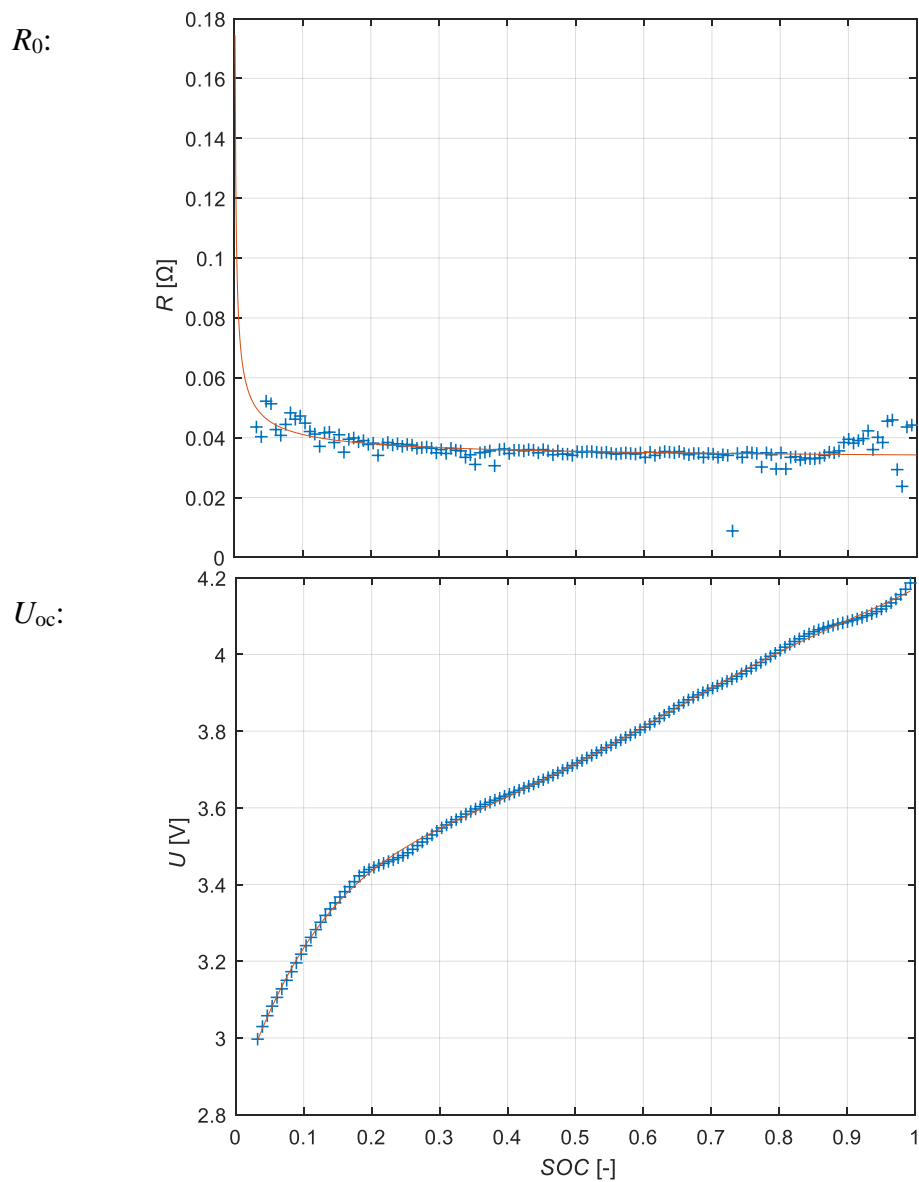


C_{pk} :



Obr. 19: Určené parametry R_0 , R_{pk} , C_{pk} pro dvě paralelní větve





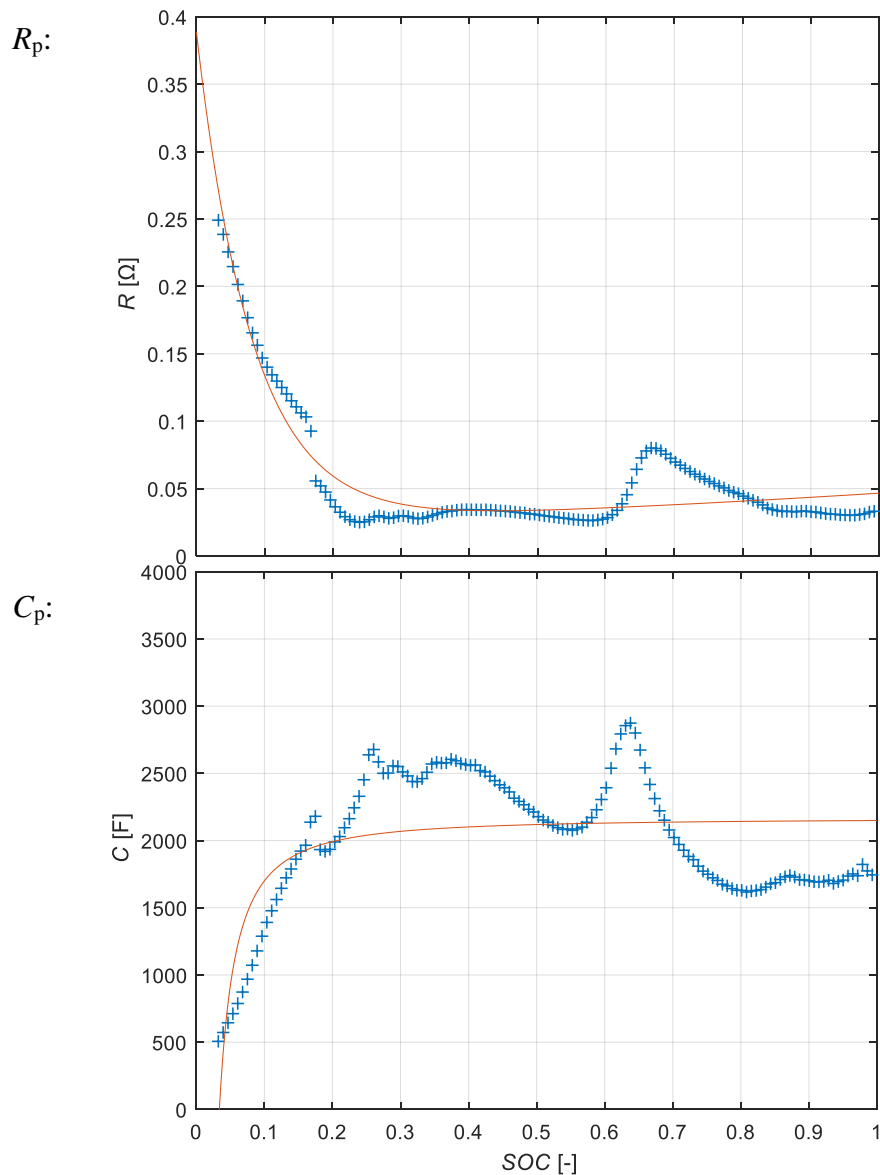
Obr. 21: Určené parametry R_0 , U_{oc} pro jednu paralelní větev

Pro co nejpřesnější reprezentaci bodů byl proložen R_0 funkcí (4.14).

$$R_0(SOC) = 0.002319 \cdot SOC^{-0.5962} + 0.03191 \quad (4.14)$$

Tato funkce je však použitelná pouze do SOC 5 %, při nižších hodnotách dochází k velké chybě. Parametr U_{oc} je zde proložen funkcí (4.15).

$$U_{oc}(SOC) = 8.23 \cdot SOC^5 - 26.27 \cdot SOC^4 + 31.57 \cdot SOC^3 - 17.67 \cdot SOC^2 + 5.47 \cdot SOC + 2.83 \quad (4.15)$$



Obr. 22: Určené parametry R_p , C_p pro jednu paralelní větev

Zde byl proložen R_p složenou exponenciálou, bylo by však možné dosáhnout větší přesnosti, a to proložením celé křivky po částech.

$$R_p(SOC) = 0.3652 \cdot e^{-12.12 \cdot SOC} + 0.02354 \cdot e^{0.6828 \cdot SOC} \quad (4.16)$$

Tak jako v případě R_p i zde by šla křivka proložit po částech a zvýšila by se tím přesnost proložení, nebylo to však nezbytné, jelikož i s aktuálním proložením křivka dodává dostatečně přesné výsledky.

$$C_p(SOC) = -17.96 \cdot SOC^{-1.415} + 2167 \quad (4.17)$$

5 MATEMATICKÝ MODEL V PROGRAMU MATLAB

V této části práce vytvoření našeho modelu bude krátce představen MATLAB a jeho simulační rozšíření Simulink, ve kterém bude následně vytvořen samotný model. Tento model bude následně testován na různé vybíjecí proudy.

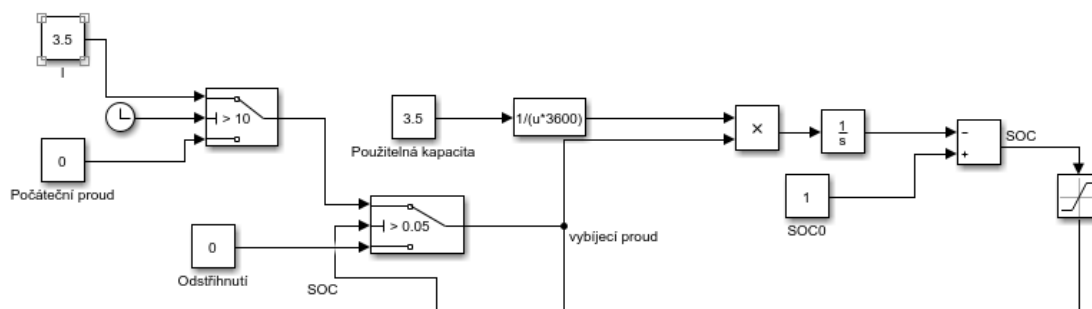
MATLAB je programovací platforma, kterou vydala v roce 1984 firma MathWorks. Je navržen pro analyzování dat, tvorbu skriptů, výpočtů, vytváření modelů a mnoho dalšího. Výpočtový systém MATLAB je založen na maticích a obsahuje velké množství toolboxů pro simulace a tvorbu systémů v různých prostředích. V této práci budu využívat toolbox, jehož název je Simulink. Simulink je grafické programovací prostředí pro analyzování, simulování a modelování dynamických, časově závislých systémů. Práce s ním spočívá v grafickém vyjádření rovnic v blocích a jejich následné spojování a vytváření systémů.

5.1 Vytvoření modelu

Vytvoření modelu je možné rozdělit na dvě části. První částí je obecná vybíjecí část a druhou částí je nabíjecí část, která se liší nutností přidání PI regulátoru, kdy součástí druhé části je také úprava modelu na výpočet a porovnání s naměřenými daty.

Při vytvoření obecného matematického modelu bylo vycházeno z rovnic, které popisují vybraný model tak jako bylo popsáno v kapitole 3.7. Jelikož jsou všechny rovnice popisující model závislé na stavu nabití (state-of – charge), tak je zapotřebí vytvořit blokové schéma popisující změnu stavu nabití ze známé počáteční hodnoty na neznámou výslednou hodnotu za určitý čas simulace, který reprezentuje dobu používání baterie. Pro tento výpočet byla použita rovnice (3.15).

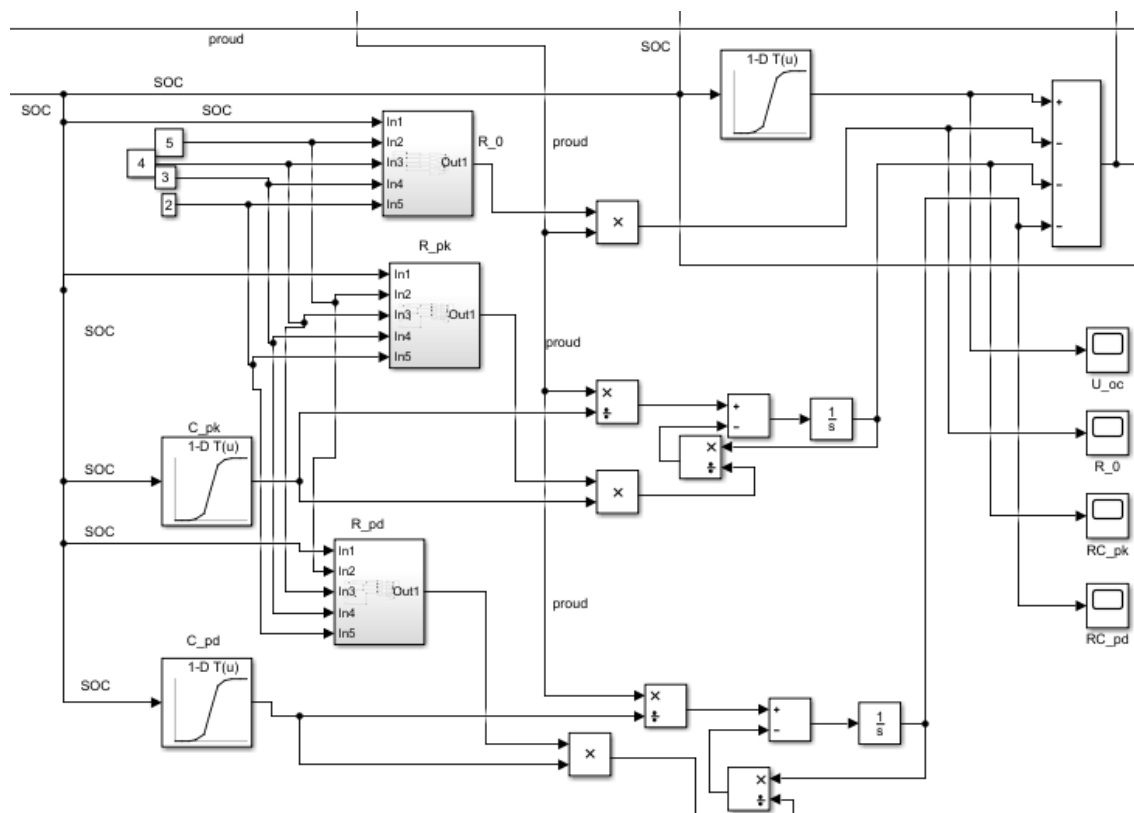
Jelikož, tak jak bylo řečeno v kapitole 3.6, tento model neuvažuje ztrátu kapacity vlivem počtu provedených cyklů či skladováním, bude použita jako C_{po} hodnota kapacity baterie tak, jak je udávána od výrobce, či, tak jako v tomto případě, bude spočítána z naměřených dat. Určení této kapacity bylo popsáno v předešlé kapitole, jelikož pro tvorbu schématu v prostředí Simulink její hodnota není až tak podstatná a je měněna pouze v rámci bloku konstanty.



Obr. 23: Blokové schéma výpočtu SOC

Na Obr. 23 je možné vidět blokové schéma výpočtu stavu nabití. Toto schéma je možné rozdělit na několik částí. První část zajišťuje, aby vybíjecí proud byl aplikován až po době 2 vteřin. Další podmínka, která je v první části, zajišťuje odpojení baterie při 5% kapacity a substituuje bezpečnostní obvod, který je nutný pro správné používání Li-ion článků. V další části lze vidět blokově zrealizovanou rovnici (3.15), kde na výstupu z bloku Subtract je už pouze signál o stavu nabití, který je omezován saturací, to znamená, že hodnota SOC bude nabývat pouze hodnot v rozmezí 0 až 1.

Z přechozího schématu vystupují dvě hodnoty, jednou z nich je stav nabití SOC a druhou z nich je vybíjecí proud. Aplikací napětového Kirchhoffova zákona na vybraný matematický model a aplikací rovnic pro každou složku obvodu jsme schopni určit napětí na baterii či úbytky napětí pro každou složku. Pro zjištění napětí bez úbytků na odporech a kondenzátorech je zde využitý blok 1-D Lookup table, který k hodnotám SOC přiřadí hodnotu napětí. Pro správnou funkci musí být tato hodnota spočítána již ve skriptu.



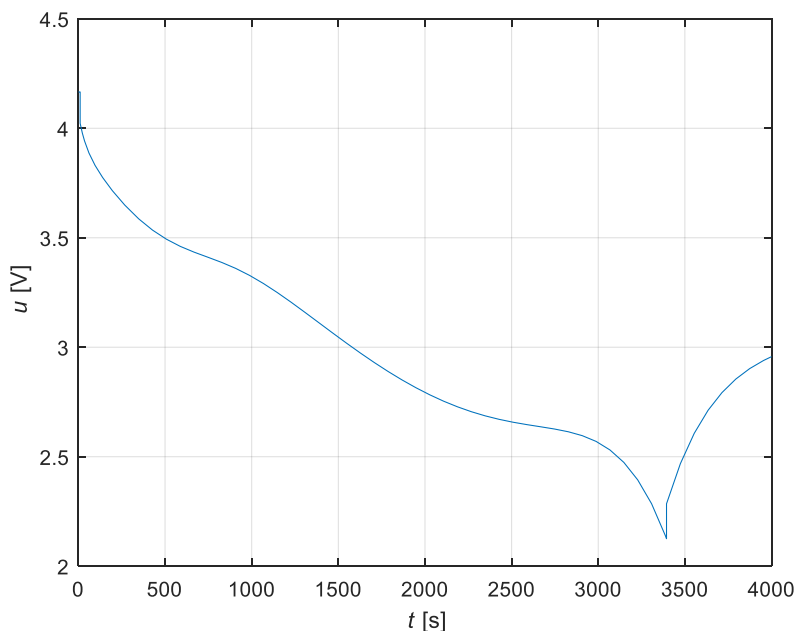
Obr. 24: Blokové schéma výpočtu parametrů obvodu a aplikace 2. Kirchhoffova zákona

Tak jak je možné vidět na Obr. 24 hodnoty obou dvou kondenzátorů, byly, tak jako napětí, zjištěny z 1-D Lookup table, jehož přiřazení hodnot proběhlo již ve skriptu a je to možné vidět na Obr. 25. Hodnoty parametrů pro výpočet byly zjištěny z proložení závislosti kapacity na stavu nabití polynomem pátého stupně. Hodnoty odporů R_0 , R_{pk} a R_{pd} byly zjištěny implementací rovnic extrahovaných z proložení polynomem přímo do prostředí Simulink. Pro výpočet výsledného napětí baterie byl aplikován 2. Kirchhoffův zákon, který říká, že součet napětí na prvcích v uzavřené smyčce je vždy roven nule.

```
%SOC
SOC = [0:0.001:1];
SOC_vybijeni = 0.99;
SOC_nabijeni = 0.05;
C_pd = C_L_parametr(1)*SOC.^5 + C_L_parametr(2)*SOC.^4 +
        C_L_parametr(3)*SOC.^3 + C_L_parametr(4)*SOC.^2 +
        C_L_parametr(5)*SOC + C_L_parametr(6);
```

Obr. 25: Výpočet ve skriptu pro 1-D Lookup table

Výstupem matematického modelu je vybíjecí charakteristika, kterou můžeme vidět níže.



Obr. 26: Obecná vybíjecí charakteristika Li-ion článku

5.2 Vytvoření modelu dle naměřených průběhů

Pro vytvoření dynamického modelu, který bude simulovat provedené měření na článku, bylo vycházeno z vytvořeného obecného modelu. Tento model bylo nezbytné rozšířit o část, která bude zajišťovat nabíjení. Tato část obsahuje PI regulátor, který je zde použit pro správnou funkci nabíjecí části, ochranné prvky a výpočet chyby. Pro srovnání funkčnosti modelů byly vytvořeny 2 modely, které byly následně srovnány s reálnými průběhy. Jeden model vychází ze složitějšího Vylepšeného Theveninova modelu a počítá s dvěma větvemi na přechodné děje a druhý model je klasický Theveninův model, který zanedbává dlouhodobé přechodné děje.

5.2.1 PI regulátor

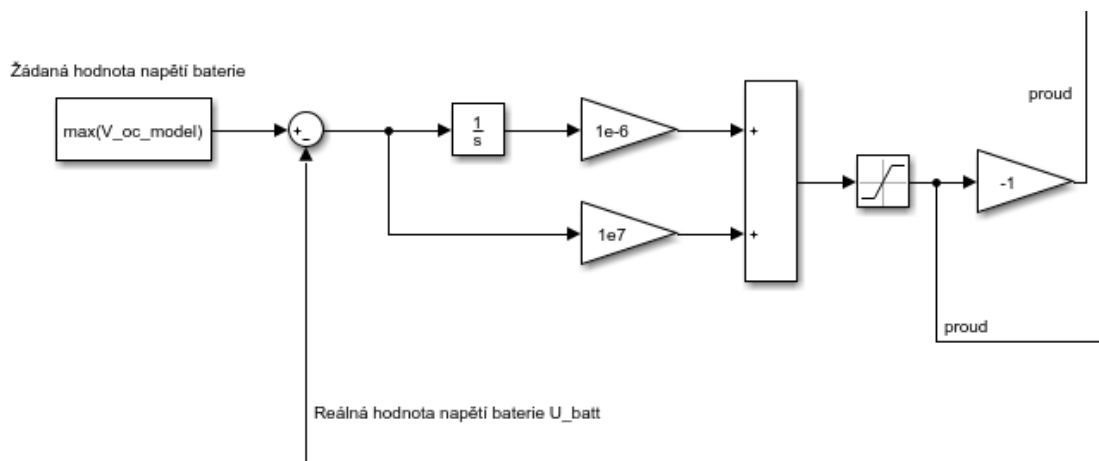
Pro správnou funkčnost modelu zde byl implementován regulátor. Regulátory jsou zařízení, jejichž funkcí je nastavování a udržování žádané hodnoty námi snímané veličiny, za pomoci zpětné vazby, která kontroluje reálnou hodnotu na výstupu soustavy.

Regulovaná soustava se skládá ze samotného regulátoru, řízeného objektu a také snímače, který dává informaci o výstupní veličině.

Regulátory můžou být několika typů. Základní členění je na regulátory typu:

- P-regulátor – neboli proporcionální, tento typ regulátoru má funkci lineárního zesilovače a odezvou na jednotkový skok je zase skok, který je však zesílený samotným regulátorem
- I-regulátor – neboli integrační, tento typ regulátoru má to specifikum, že neustále reguluje reálnou hodnotu od požadované, nevýhoda tohoto regulování, je v možném vzniku kmitů
- D-regulátor – neboli derivační regulátor, tohoto typu regulátoru není reálně možné dosáhnout, z důvodu velké parazitní setrvačnosti
- PI-regulátor – neboli proporcionálně integrační, je to kombinace vlastností P a I regulátoru a jejich výhoda spočívá v lepším přenosu na vyšších frekvencích a rychleji díky tomu regulují odchylky či poruchy v regulovaném systému
- PD-regulátor – neboli proporcionálně derivační, jejich hlavní rozdíl vůči PI regulátorům spočívá ve zhoršeném odstranění regulační odchylky a díky tomu nejsou často využívány
- PID-regulátor – vzniká kombinací všech třech základních typů regulátorů a jejich výhoda spočívá v úplném odstranění regulační odchylky, ale díky své složitosti nejsou velmi často využívány [18]

Důvod použití regulátoru v tomto modelu vyvstával ze skutečnosti, že nabíjení baterie probíhá dle teorie použitím proudového zdroje, který baterii nabíjí proudem, který je po celou dobu konstantní. Reálné nabíjení baterie však probíhá pomocí napěťového zdroje s nastaveným proudovým omezením. Díky této skutečnosti bylo nutné implementovat PI regulátor, který reguluje hodnotu nabíjecího proudu tak, aby nabíjecí napětí nabývalo neustále stejné hodnoty jako je hodnota napětí baterie při plném nabití.



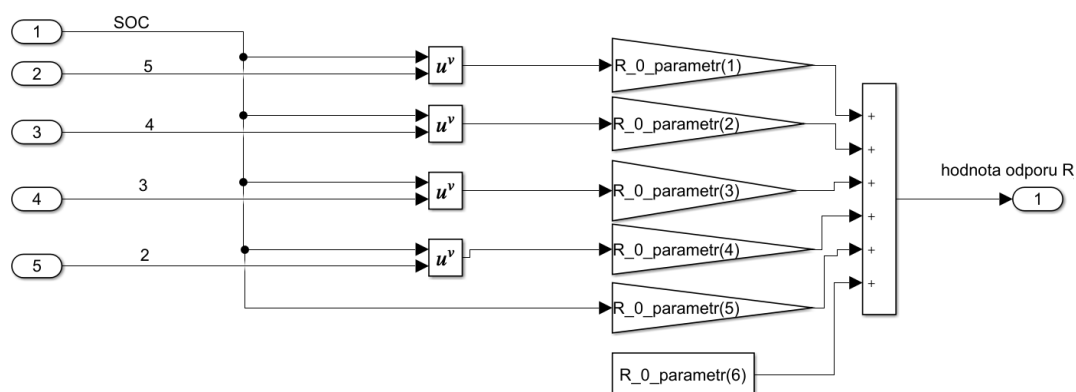
Obr. 27: PI regulátor

Provedení regulátoru je možné vidět na Obr. 27, kde lze vidět srovnávání žádané hodnoty s reálnou a reálná regulace proudu. Velikost proudu je v této situaci omezena saturací.

5.2.2 Vybíjecí část

Pro vytvoření vybíjecí části modelu bylo vycházeno z obecného modelu vytvořeného výše, který byl upraven na parametry měřeného článku. Tato úprava byla provedena na základě rovnic, které byly extrahovány z dat pro každý prvek náhradního schématu, viz kapitola o identifikaci. Hodnoty všech prvků byly spočítány ve skriptu, tak jak bylo ukázáno výše, a byly přiřazeny hodnotě stavu nabití (SOC). Díky tomu je možné vytvořit křivku pro každý prvek, která je závislá pouze na stavu nabití a pokud je tato křivku proložena vhodnou funkcí či polynomem, potom lze dostat rovnici, která je následně implementována do Simulink. V tomto případě byl nejvhodnější polynom pátého stupně.

Tato rovnice, která je pro každý prvek unikátní, byla implementována do Simulinku. Hodnoty kapacit byly zjišťovány pomocí 1-D Lookup table, který přiřazoval hodnoty kapacity k hodnotám nabití. Hodnoty odporů byly řešeny pomocí subsystémů, které obsahují jako vstup stav nabití a dle toho počítají velikost odporu. Řešení subsystému lze vidět na Obr. 28.

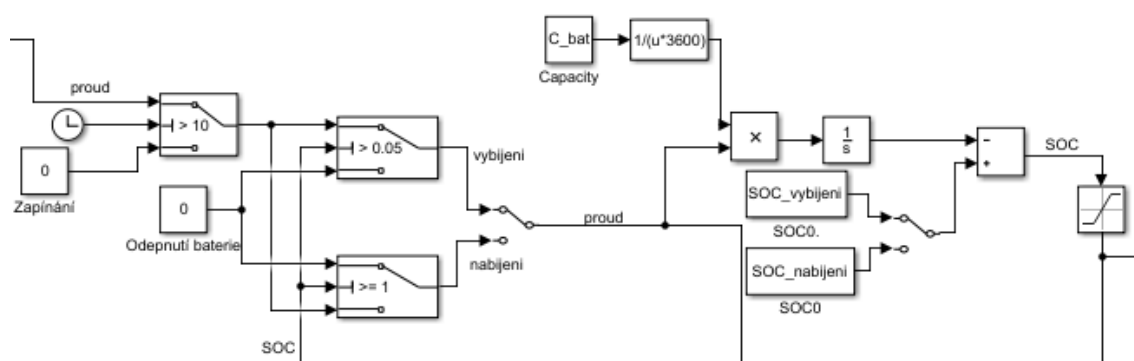


Obr. 28: Subsystem výpočtu odporu

Těmito prvky byly nahrazeny parametry z obecného dynamického modelu, který byl vytvořen v kapitole 5.1. Tak jako v obecném modelu i zde byl uplatněn Kirchhoffův zákon společně s Ohmovým zákonem.

5.2.3 Nabíjecí část

Pro vytvoření nabíjecí části je nutné si uvědomit v čem se v rámci výše psaných rovnic liší nabíjení článku od vybíjení článku. Odpovědí je, že jelikož jsou rovnice popisující samotné prvky závislé pouze na stavu nabití, tak lze tyto rovnice použít i pro nabíjecí část a celé schéma se bude lišit pouze v úpravě znamének pro výpočet stavu nabití, jelikož při vybíjení je od stavu nabití odečítána energie, při nabíjení energie musí být přičtena. V nabíjecí části je nezbytné taktéž přidat další omezovací prvek, zde je to „Switch“, který brání nabíjení přes zadanou hodnotu. Tento prvek nahrazuje bezpečnostní obvod v baterii. Tento omezovací prvek společně s omezovacím prvkem pro vybíjení lze vidět na obrázku níže. Celé spojení všech částí je poté možno vidět v příloze této práce.

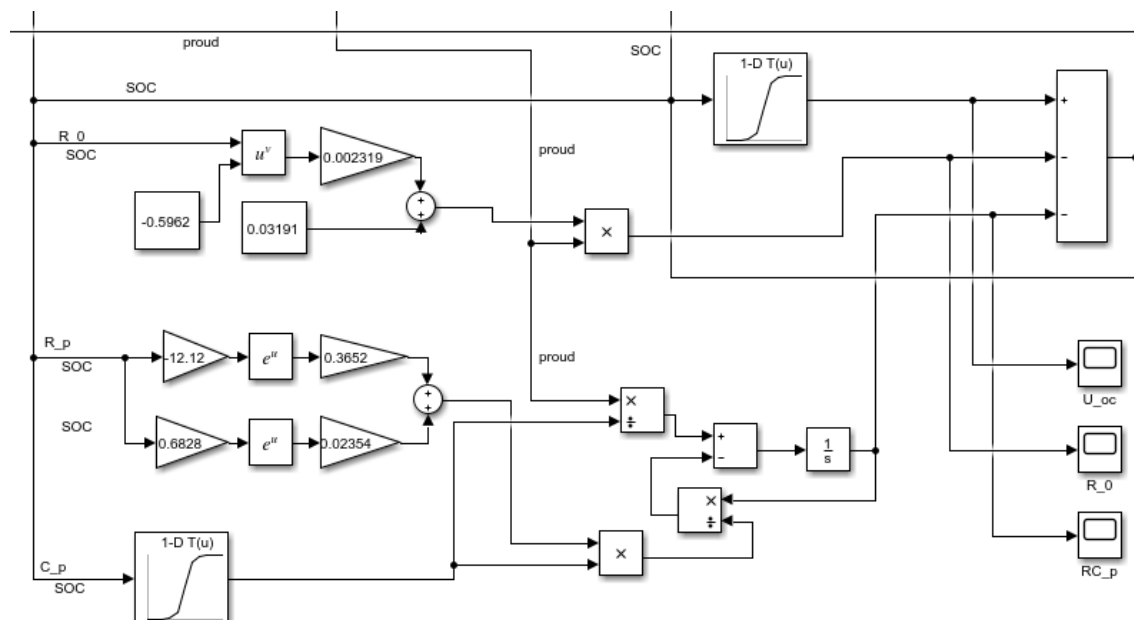


Obr. 29: Bezpečnostní obvod

5.2.4 Vytvoření prvního typu realizovaného modelu – jednodušší model

Pro ověření správnosti zvolení typu matematického modelu byl vytvořen taktéž zjednodušený model, který vychází z Theveninova modelu. Jeho hlavním rozdílem je oproti Vylepšenému Theveninově modelu zanedbání druhé paralelní RC větve, to znamená, že neuvažuje dlouhodobé přechodné děje. Samotná tvorba modelu se neliší od tvorby složitějšího Vylepšeného Theveninova modelu, jediný rozdíl spočívá v počtu prvků, pro které počítáme úbytky napětí.

Tak jako v předchozí části i zde byly parametry obvodu spočítány ve skriptu, tak jako bylo popsáno v kapitole 4.2, a následně proloženy křivkou. Zde byly v případě vnitřního odporu body proloženy mocninou funkcí druhého řádu, která procházela body lépe, než jakýkoli polynom n -tého stupně. U přechodného odporu byla zase použita exponenciální funkce 2. řádu a pro přechodnou kapacitu bylo, tak jako v případě složitějšího modelu využito bloku 1-D Lookup table. Proložení bylo v tomto případě provedeno manuálně pomocí nástroje „*cftool*“ a to z důvodu srovnání jednotlivých prokládacích funkcí mezi sebou dle kritéria „*R-square*“, které udává hodnotu věrohodnosti proložené funkce s původními body. Rovnice byly následně implementovány do Simulinku, tak jako v předchozím případě či v případě obecného modelu.



Obr. 30: Schéma zjednodušeného modelu

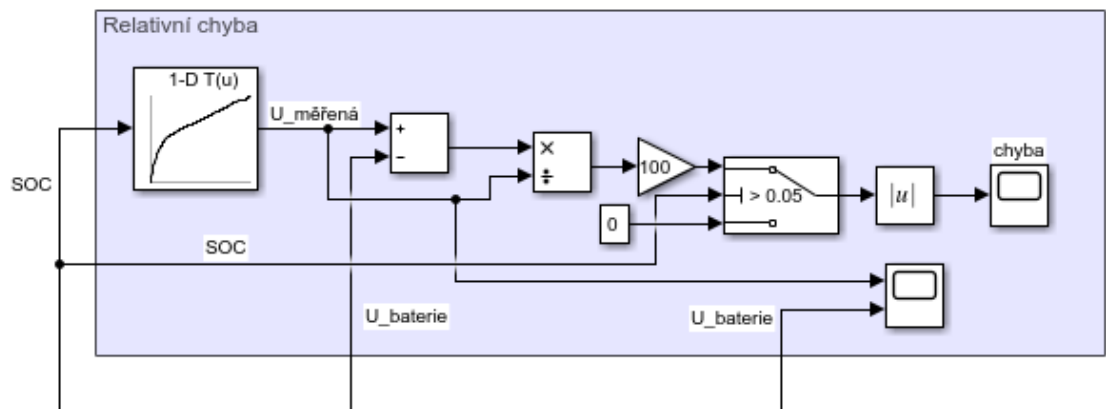
5.2.5 Výpočet chyby

Výpočet chyby je základním hodnotícím kritériem pro posouzení úspěšnosti a přesnosti celého modelu. Tak jako všechny výpočty v Simulinku je i výpočet chyby nutné provést v rámci blokového schématu a je důležité taktéž srovnat výstupní vybíjecí či nabíjecí charakteristiku modelu s charakteristikou reálného měření na Li-ion článku.

Důležitější chybou je v rámci našeho měření chyba relativní, která udává poměr rozdílu simulované od měřené veličiny vůči měřené veličině. Měřená veličina U_m je v našem případě brána jako referenční, a proto se k ní odkazujeme a počítáme k ní i chybu.

$$\delta_r = \left(\frac{U_m - U_s}{U_m} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (5.1)$$

Implementaci této rovnice můžeme vidět na přiloženém obrázku. Pro správný výpočet, zde byl přidán blok „Switch“, který odřízne výpočet chyby ve chvíli kdy je baterie odpojena z důvodu poklesu stavu nabití pod 5 %.

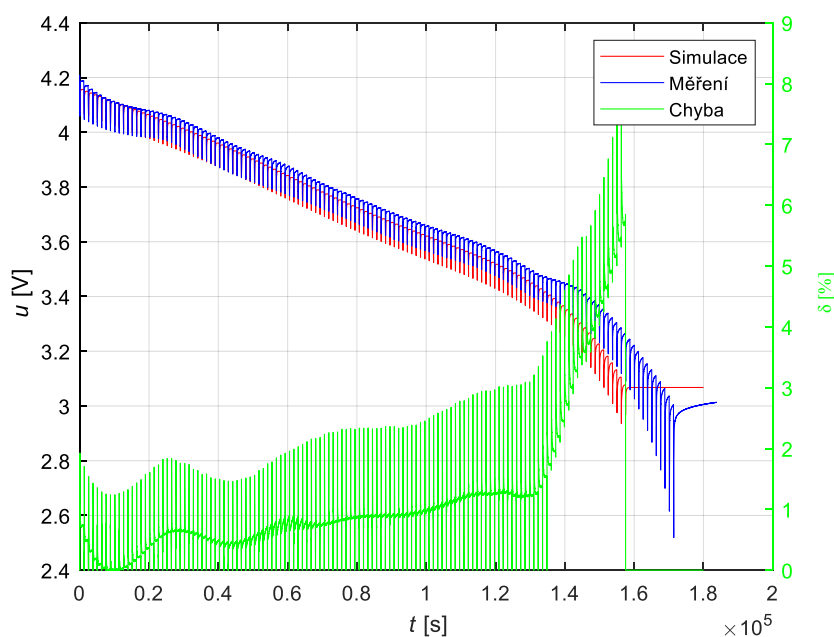


Obr. 31: Výpočet relativní chyby měření

6 SROVNÁNÍ MĚŘENÝCH DAT S VÝSLEDKY SIMULACE

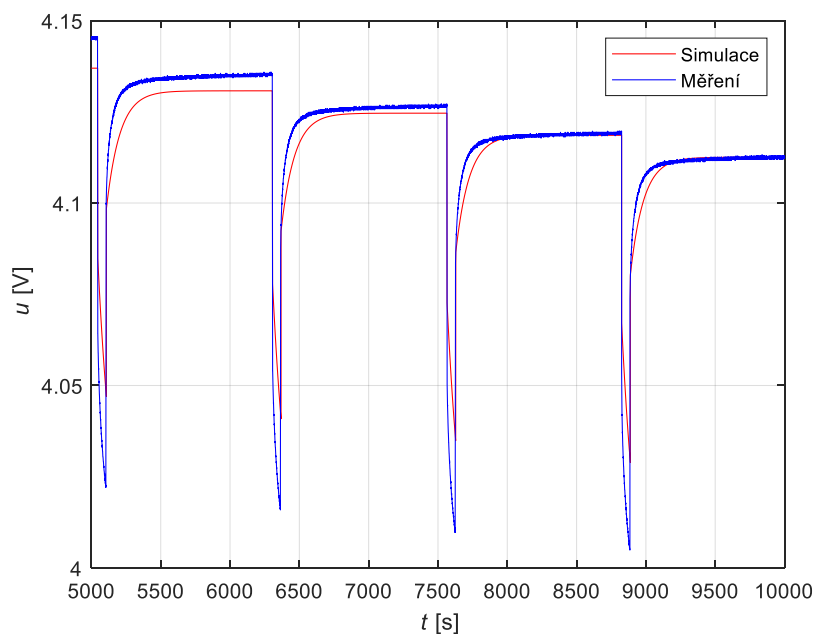
V této části bakalářské práce budou srovnány průběhy výstupních napětí obou dvou vytvořených modelů s průběhy reálného měření a bude zhodnocena jejich přesnost.

6.1 Pulsní vybíjení



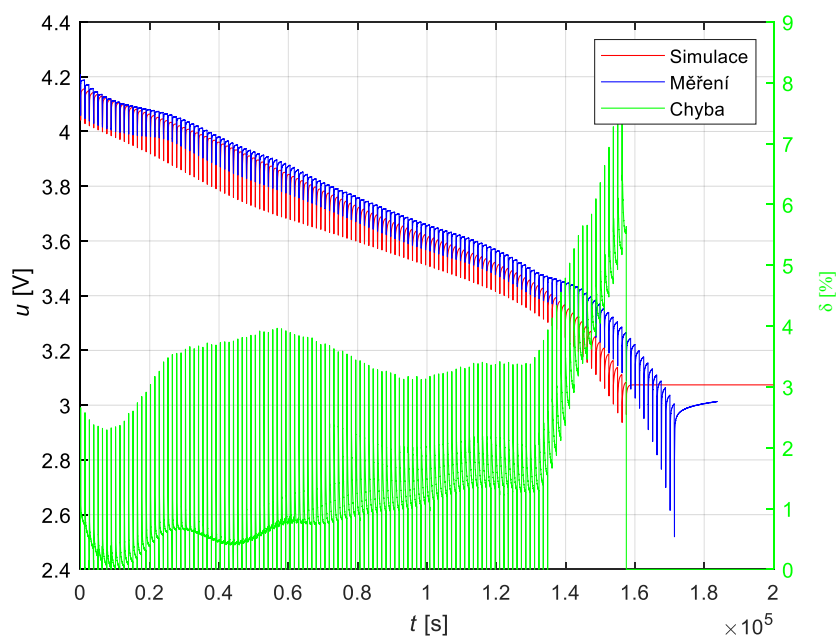
Obr. 32: Srovnání měření se simulací pro pulsní vybíjení pro jednodušší model

Jako první srovnání bylo zrealizováno pulsní vybíjení pro jednodušší model. Vybíjení probíhalo vždy po dobu jedné minuty s následným 20-ti minutovým ustálením. Je zde patrné, že s klesajícím stavem nabití roste chyba. Tuto skutečnost je možné přisoudit hůře určeným parametrům v oblasti nízkého SOC, jelikož proložení křivkou není vždy perfektní. Na obrázku níže je možné vidět detail Obr. 32 v čase od 5000 do 10000 vteřin.



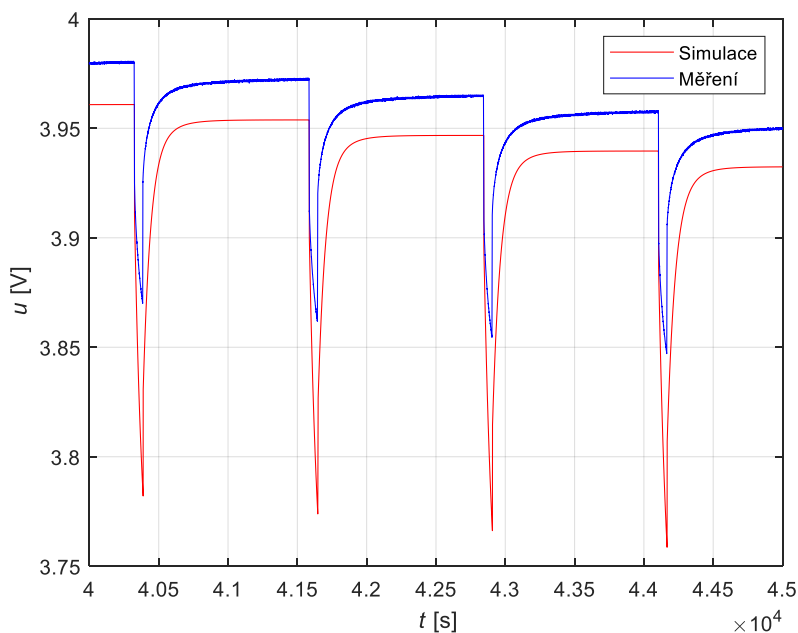
Obr. 33: Detail srovnání pulsního vybíjení pro jednodušší model

Zde je vidět poměrně dobré překrytí simulovaného a měřeného průběhu. Chyba v této části dosahuje průměrně hodnot 2 %. Pro srovnání je níže možné vidět průběh pulsního vybíjení v případě, že je uvažován složitější Vylepšený Theveninův model.



Obr. 34: Srovnání měření se simulací pro pulsní vybíjení pro složitější model

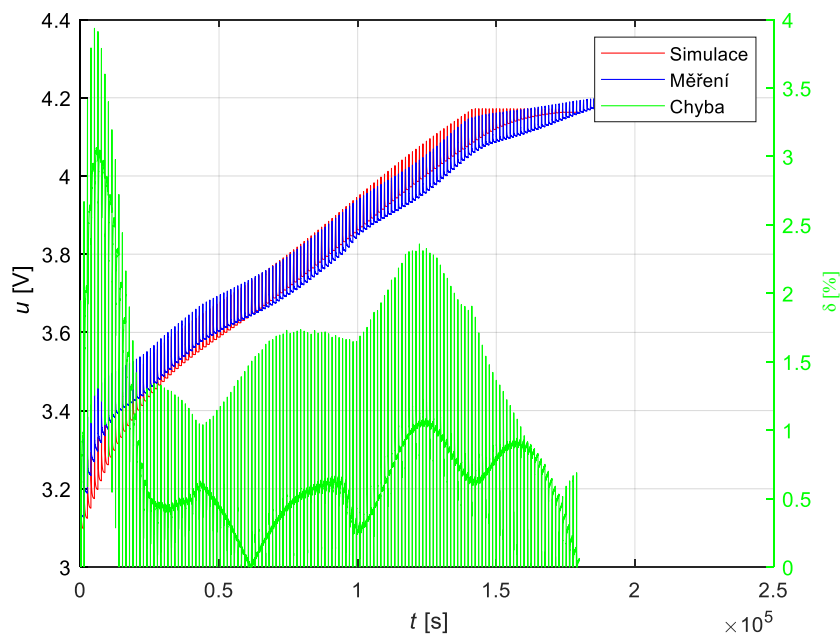
Ze všech průběhů je patrné, že největší chyba vzniká blízko úplnému vybití článku. Zde bylo možné vidět, že v průběhu vybíjení byla chyba nižší než na konci, a to okolo hodnoty 3 %, což lze považovat za slušný výsledek.



Obr. 35: Detail srovnání pulsního vybíjení pro složitější model

Pokud bychom chtěli srovnat oba modely mezi sebou, tak můžeme vidět, že v rámci vybíjení lze považovat jednodušší Theveninův model za vhodnější na tvorbu modelu, jelikož přesnost určení parametrů baterie a následně celková přesnost modelu je vyšší.

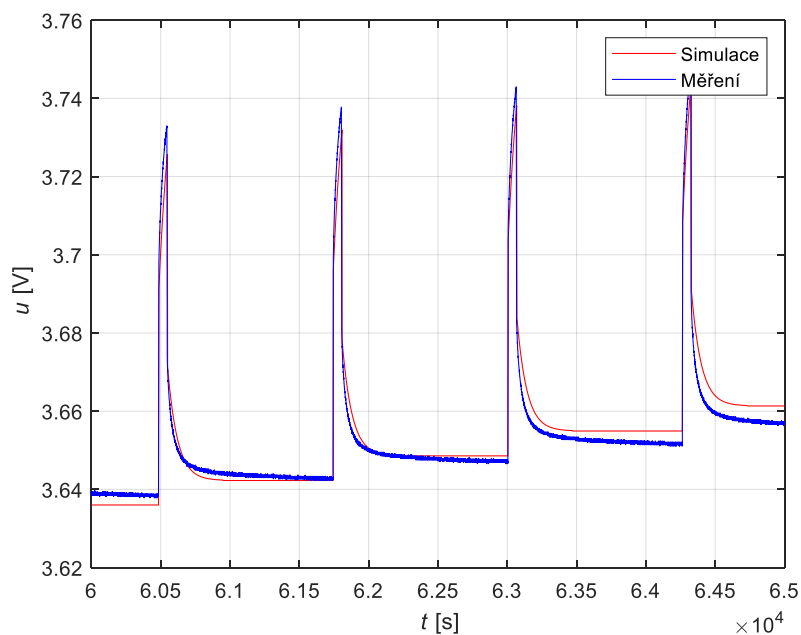
6.2 Pulsní nabíjení



Obr. 36: Srovnání měření se simulací pro pulsní nabíjení jednoduššího modelu

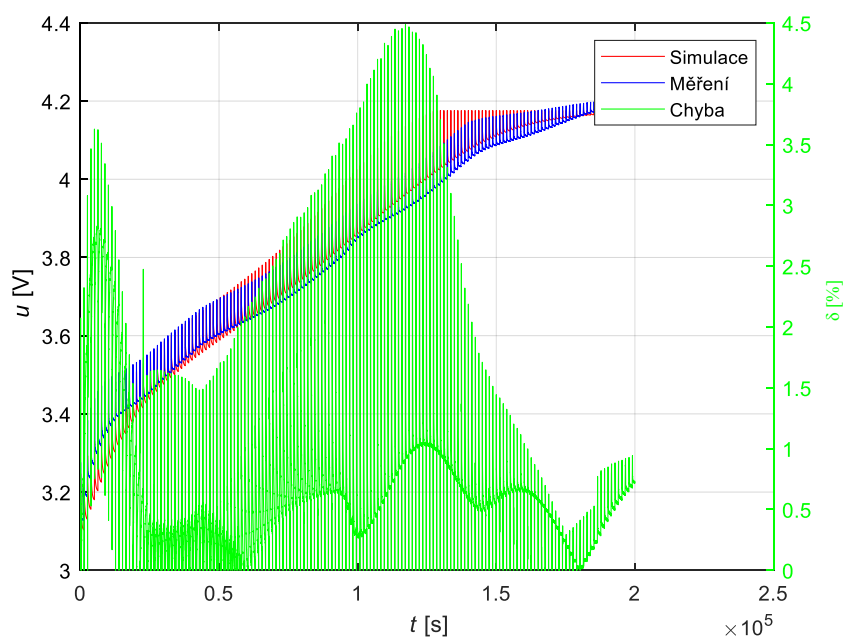
Dalším srovnáním je srovnání pulsního vybíjení. Pulsní vybíjení, tak jako nabíjení, probíhalo v úsecích dlouhých 21 minut, přičemž baterie 20 minut „odpočívala“ a následovně byla nabíjena po dobu jedné minuty.

Na simulaci na Obr. 36 jde vidět, že simulovaná baterie má větší odchylku při hodnotách SOC blízkých nule. Když se však dostane SOC na větší hodnoty, relativní chyba se sníží a ke konci měření dosahuje velmi dobrých hodnot. Na dalším obrázku můžeme vidět detail výše zmíněného nabíjení v čase zhruba 17-ti hodin od počátku nabíjení.



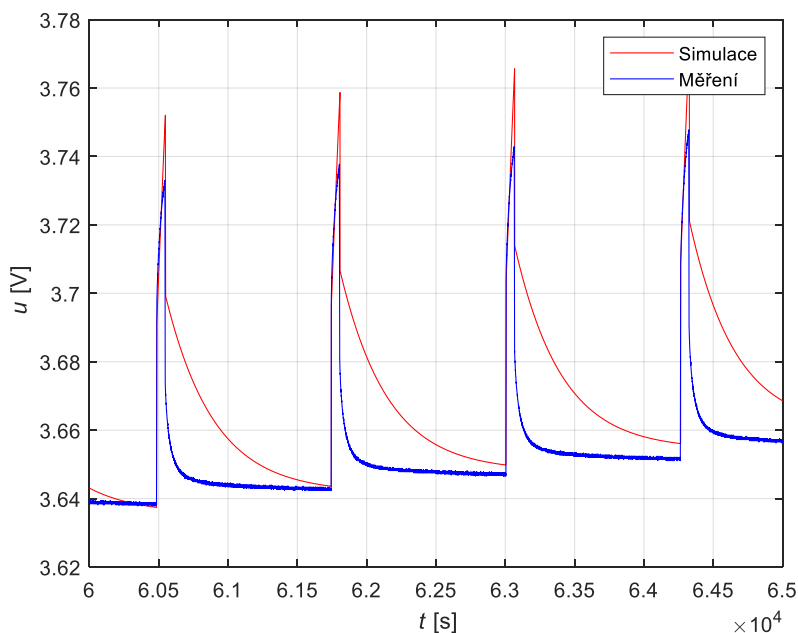
Obr. 37: Detail srovnání pulsního nabíjení pro jednodušší model

Z detailu je patrné, že v rámci jednoduššího modelu byly vnitřní parametry určeny velmi přesně, což podtrhuje i taktéž chyba, která v rámci nabíjení dosahuje průměrné hodnoty 1 %.



Obr. 38: Srovnání měření se simulací pro pulsní nabíjení složitějšího modelu

Z grafu je patrné, že v rámci Vylepšeného Theveninova modelu přesnost určování parametrů baterie klesala. Jednou z věcí, která mohla být příčinou chyby, je složitější prokládací křivka, díky které procento úspěšných proložení významně kleslo.



Obr. 39: Detail srovnání pulsního nabíjení pro složitější model

Zde je patrné, že proložená křivka není nepřesnější vůči měření a díky tomu přesnost modelu klesla.

Při celkovém zhodnocení funkčnosti vychází jako vhodnější řešení jednodušší Theveninův model, který pracoval s velmi malou chybou a byl schopen věrohodně simulovat průběh zatížení. Jeho výhodou je taktéž jednodušší implementace do MATLAB či do Simulinku, jelikož obsahuje pouze jednu paralelní větev. Pokud by však cílem bylo navrhnout opatření pro zvýšení přesnosti, byl by vhodnější Vylepšený Theveninův model, jelikož v případě rozdělení prokládací funkce na části a celkově lepšího proložení by pravděpodobně dosahoval lepší přesnosti než klasický Theveninův model. V tomto případě však dával horší výsledky, protože je složitější správně vyhodnotit vnitřní parametry baterie.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo provedení literární rešerše matematických modelů Li-Ion článků a vybrání toho nejvhodnějšího pro vytvoření dynamického modelu, který by byl schopen simulovat vybíjení a nabíjení baterie.

V první části byla přiblížena funkce a význam Li-Ion baterií v dnešním světě, jejich vývoj a výhody a nevýhody jejich používání vůči jiným typům baterií.

Další část byla věnována popsání modelů, které mohou být použity na co nejvěrohodnější interpretaci Li-Ion baterie pro následnou simulaci. Po zhodnocení několika nejpoužívanějších modelů, byla jako jedna z hlavních kritérií pro výběr vzata věrohodnost modelu vůči reálnému článku. Nakonec byly vybrány dva modely, klasický Theveninův model a Vylepšený Theveninův model, pro možnost následného srovnání mezi sebou a porovnání výsledků simulací.

Následující část této práce se zabývala zpracováním dat a identifikací vnitřních parametrů samotného článku na základě dat obdržených od vedoucího práce. Identifikace proběhla v rámci programu MATLAB a je díky tomu použitelná pro identifikaci parametrů jakékoliv baterie, pouze na základě naměřených dat.

Další část této práce se zabývala přiblížením procesu vytváření vybraných dynamických modelů v programu MATLAB, za použití simulačního prostředí Simulink. Byl podrobně popsán proces vytváření, tak jako byly popsány jeho dílčí části. Oba dva modely byly následně testovány na průběhy dle měřených dat.

V poslední části této bakalářské práce byly srovnány výsledky simulací mezi oběma modely a taktéž bylo provedeno srovnání s reálnými průběhy. Oba dva modely zvládli věrohodně reprezentovat vybíjení či nabíjení baterie. Jednodušší Theveninův model dosahoval lepších výsledků než složitější model, tato skutečnost byla dána nepřesnostmi v určování parametrů, které jsou patrné z obrázků.

Výsledkem této práce je tedy navržený nejvhodnější matematický model pro simulování reálných průběhů na baterii. Je zde taktéž popsán princip určení parametrů neznáme baterie a princip vytvoření dynamického modelu v rámci programu MATLAB – Simulink. V závěru je ověřena funkčnost jak dynamického modelu, tak je zde ověřena funkčnost modelu vůči reálnému průběhu.

Literatura

- [1] VINCENT, Colin Angus a Bruno SCROSATI. *Modern batteries: an introduction to electrochemical power sources*. 2. New York: Copublished in North, Central and South America by Wiley, 1997. ISBN 03-406-6278-6
- [2] Abeceda baterií a akumulátorů: Li - akumulátory. *Battex: Abeceda baterií a akumulátorů* [online]. Slaný, 2018 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/li-akumulatory>
- [3] LANGER, L. *Modelování Lithium Iontových akumulátorů pomocí ECM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2017. 73 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Vyroubal, Ph.D.
- [4] WAKIHARA, Masataka. *Recent developments in lithium ion batteries* [online]. Tokyo, 2001 [cit. 2018-12-13]. Dostupné z: https://www.hulliger.dcb.unibe.ch/pages/teaching/anorg_chemie/scripts/lithium_batteries.pdf
- [5] What does Elevated Self-discharge Do?. In: *Battery University* [online]. Vancouver, 2018 [cit. 2018-12-23]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/elevating_self_discharge
- [6] Is Lithium-ion the Ideal Battery?. *Battery University* [online]. Vancouver, 2018 [cit. 2018-12-23]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/archive/is_lithium_ion_the_ideal_battery
- [7] HE, Hongwen, Rui XIONG a Jinxin FAN. Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach. *Energies* [online]. 2011, **4**(4), 582-598 [cit. 2018-12-25]. DOI: 10.3390/en4040582. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/4/4/582>
- [8] WANG, Ximing, Hongwen HE, Fengchun SUN a Jieli ZHANG. Application Study on the Dynamic Programming Algorithm for Energy Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *Energies* [online]. 2015, **8**(4), 3225-3244 [cit. 2018-12-25]. DOI: 10.3390/en8043225. ISSN 1996-1073. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/4/3225>

- [9] CHEN, M. a G.A. RINCON-MORA. Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I–V Performance. *IEEE Transactions on Energy Conversion* [online]. 2006, **21**(2), 504-511 [cit. 2018-12-25]. DOI: 10.1109/TEC.2006.874229. ISSN 0885-8969. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1634598/>

- [10] LIU, Congzhi, Weiqun LIU, Lingyan WANG, Guangdi HU, Luping MA a Bingyu REN. A new method of modeling and state of charge estimation of the battery. *Journal of Power Sources* [online]. 2016, **320**, 1-12 [cit. 2018-12-27]. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2016.03.112. ISSN 03787753. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378775316302804>

- [11] HONGWEN HE, RUI XIONG, XIAOWEI ZHANG, FENGCHUN SUN a JINXIN FAN. State-of-Charge Estimation of the Lithium-Ion Battery Using an Adaptive Extended Kalman Filter Based on an Improved Thevenin Model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [online]. 2011, **60**(4), 1461-1469 [cit. 2018-12-29]. DOI: 10.1109/TVT.2011.2132812. ISSN 0018-9545. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5739545/>

- [12] NIKOLIAN, Alexandros, Joris DE HOOG, Karel FLEURBAEY, Jean-Marc TIMMERMANS, Noshin OMAR, Petter VAN DEN BOSSCHE a Joeri VAN MIERLO. Classification of Electric modelling and Characterization methods of Lithium-ion Batteries for Vehicle Applications. *EEVC European Electric Vehicle Congress* [online]. 2014 [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/302964276_Classification_of_Electric_modelling_and_Characterization_methods_of_lithium_ion_batteries_for_vehicle_applications

- [13] Tabulky technických parametrů. *Rindt, a.s.* [online]. České Budějovice, 2018 [cit. 2018-12-29]. Dostupné z: http://www.rindt.cz/index_rindt/text/pretab.htm

- [14] ERDINC, O., B. VURAL a M. UZUNOGLU. A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading. 2009 *International Conference on Clean Electrical Power* [online]. IEEE, 2009, 2009, , 383-386 [cit. 2019-01-01]. DOI: 10.1109/ICCEP.2009.5212025. ISBN 978-1-4244-2543-3. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/5212025/>

- [15] LIJUN GAO, SHENGYI LIU a R.A. DOUGAL. Dynamic lithium-ion battery model for system simulation. *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* [online]. 2002, **25**(3), 495-505 [cit. 2019-01-01]. DOI: 10.1109/TCAPT.2002.803653. ISSN 1521-3331. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1159187/>

- [16] RAHMOUN, Ahmad a Helmuth BIECHL. Modelling of Li-ion batteries using equivalent circuit diagrams. *Przegląd Elektrotechniczny*[online]. 2012, **88**(7), 152-156 [cit. 2019-01-01]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/279767931_Modelling_of_Li-ion_batteries_using_equivalent_circuit_diagrams
- [17] *National Instruments* [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z:
<http://www.ni.com/cs-cz.html>
- [18] SKALICKÝ, Jiří. *Teorie řízení I*. Brno: VUT FEKT, 2002, 98 s. ISBN 80-214-2112-6.
- [19] BACCOUCHE, Ines, Sabeur JEMMALI, Bilal MANAI, Noshin OMAR a Najoua AMARA. Improved OCV Model of a Li-Ion NMC Battery for Online SOC Estimation Using the Extended Kalman Filter. *Energies* [online]. 2017, **10**(6) [cit. 2019-05-18]. DOI: 10.3390/en10060764. ISSN 1996-1073. Dostupné z:
<http://www.mdpi.com/1996-1073/10/6/764>

Seznam symbolů a zkratek

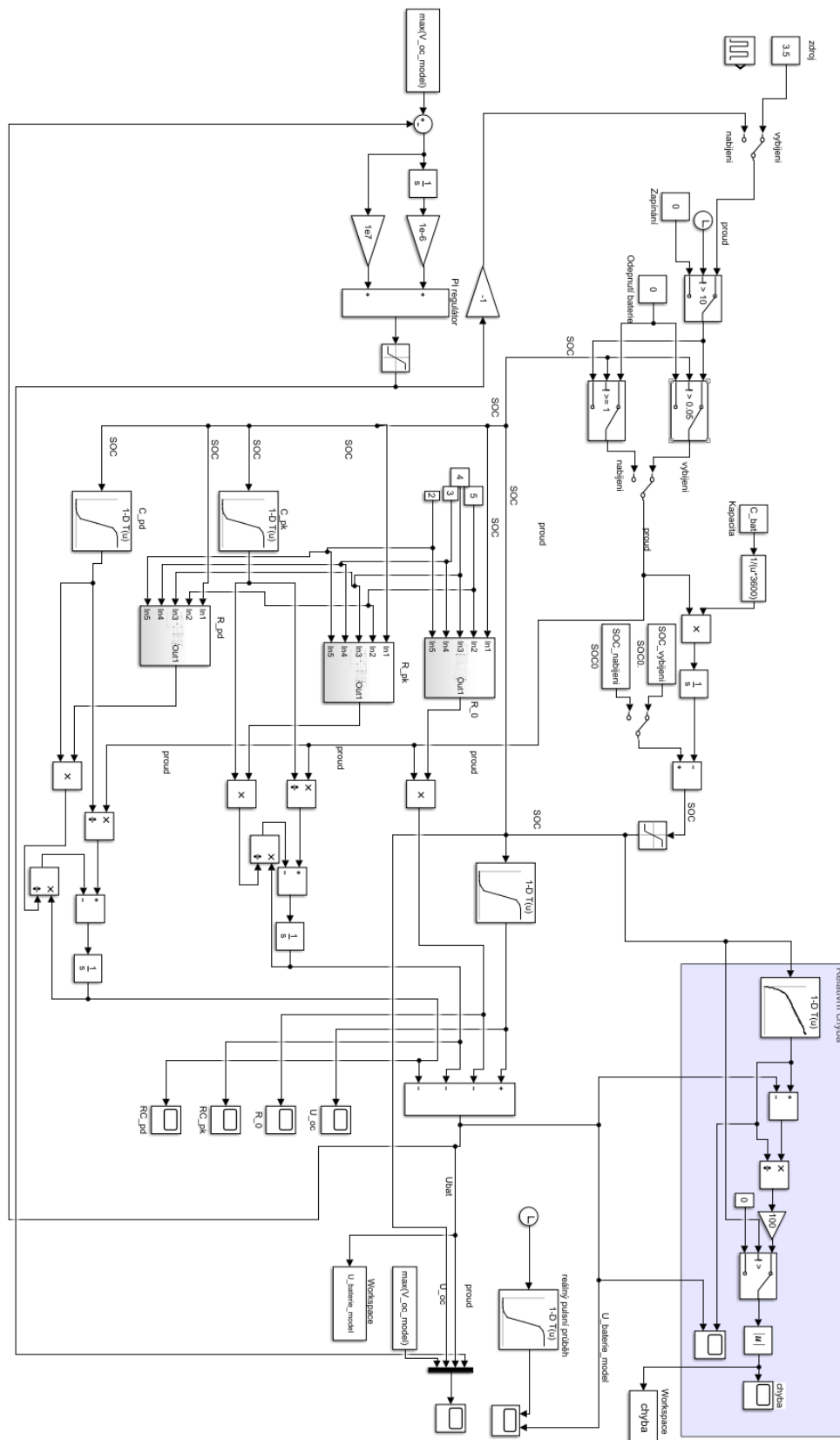
Symboly:

U	...	napětí	[V]
I	...	proud	[A]
R	...	odpor	[Ω]
C	...	kapacita	[F]
Z	...	impedance	[Ω]
ϑ	...	teplota	[°C]
T	...	termodynamická teplota	[K]

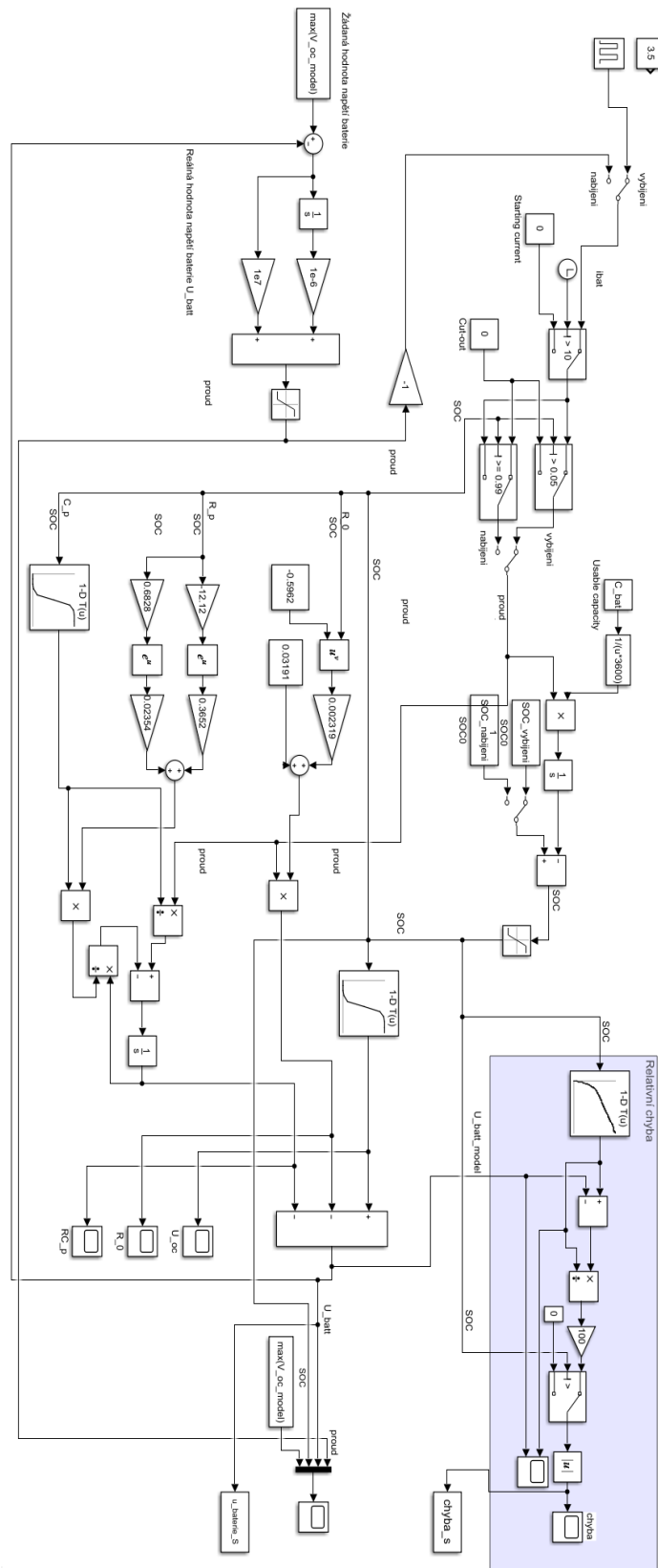
Seznam příloh

Příloha 1 - Schéma dynamického modelu v programu MATLAB	60
Příloha 2 – Schéma dynamického modelu s jednou paralelní větví	61
Příloha 3 – Průběh teploty při nabíjení měřeného článku při teplotě 50 °C	62

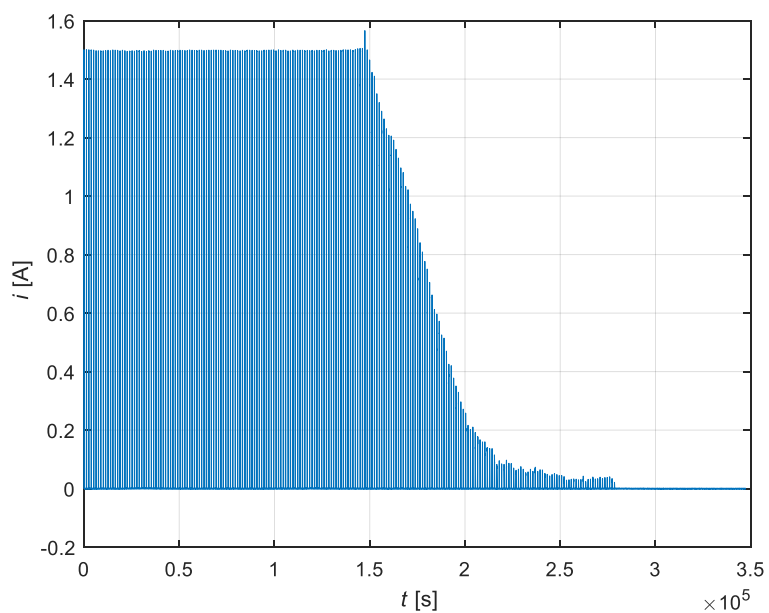
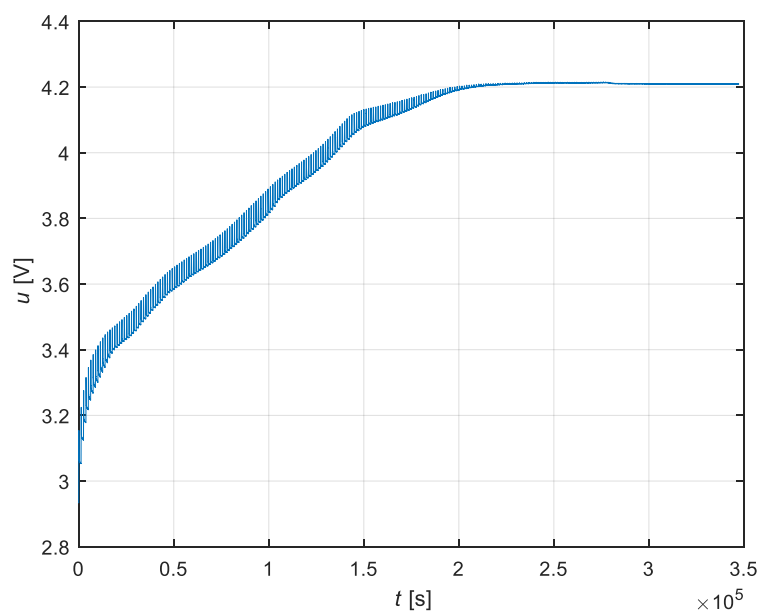
Příloha 1 - Schéma dynamického modelu v programu MATLAB

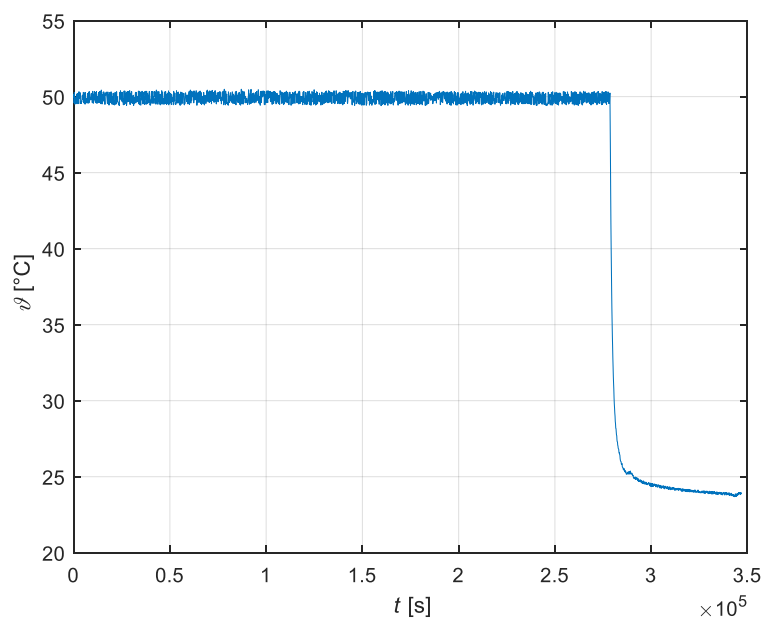


Příloha 2 – Schéma dynamického modelu s jednou paralelní větví



Příloha 3 – Průběh teploty při nabíjení měřeného článku při teplotě 50 °C





Zde je možné vidět průběh pulsního nabíjení za jiných podmínek. Zde, tak jak je vidět na přiložených průbězích, byla teplota tepelné komory nastavena na 50 °C. Je zde dobře vidět změna proudu s rostoucím SOC baterie.